

QUESTIONS RELATIVES AU DÉVELOPPEMENT DE LA BIOÉNERGIE DANS L'OUEST CANADIEN

**Document de discussion préparé pour le
Réseau action climat Canada**

**par
Ewen Coxworth**

Mars 2006

Sommaire

Ce document passe en revue les critiques récentes concernant la mise au point de certains biocarburants en Amérique du Nord, notamment l'éthanol produit par fermentation de céréales, et il examine les solutions possibles face à certains problèmes soulevés dans l'Ouest canadien.

Ce document porte essentiellement sur la production d'éthanol à partir de céréales, car la plupart des usines de biocarburant liquide construites dans l'Ouest canadien sont conçues pour produire de l'éthanol à partir de céréales, telles que le blé de printemps Canada Prairies (« blé CPS »). Le problème est de savoir si de telles usines produiront plus d'énergie renouvelable que la quantité de carburant fossile nécessaire pour produire les céréales et les transformer ensuite en éthanol, avec production additionnelle de DDGS, un coproduit pour consommation animale aussi appelé drêches de distillerie avec solubles, ainsi que de dioxyde de carbone.

Comme question secondaire, on se demande aussi quelle quantité de carburant fossile est remplacée par l'éthanol dans la production de carburant liquide comparativement à l'essence. Une réduction des intrants de carburant fossile peut aussi réduire les émissions de gaz à effet de serre pendant le cycle de vie total du carburant. La production d'essence exige des quantités significatives d'intrants de carburant fossile pour extraire du sol le pétrole brut, le pétrole lourd ou les sables pétrolifères et transformer ces matières brutes en essence et autres produits pétroliers raffinés. Comme une proportion de plus en plus grande de l'essence produite dans l'Ouest canadien est fabriquée à partir du pétrole lourd ou des sables pétrolifères, on s'attendrait à ce que les coûts énergétiques liés aux carburants fossiles et les émissions de gaz à effet de serre découlant de la fabrication de produits pétroliers raffinés augmentent, puisque ces matières premières exigent plus d'énergie pour être transformées en produits raffinés que le pétrole brut classique. L'objectif de la production canadienne de biocarburants, tels que l'éthanol, est de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre comparativement à l'essence ou au carburant diesel.

À long terme, la future production à grande échelle de biocarburants utilisera des matières premières lignocellulosiques provenant de résidus forestiers, tels que la sciure ou l'écorce, et des matières premières lignocellulosiques agricoles, telles que des résidus

de culture ou des graminées à croissance rapide. La production d'éthanol et d'autres biocarburants liquides pourrait se faire par des procédés de fermentation, entre autres selon la méthode mise au point par Iogen. Une autre voie possible serait la gazéification des matières premières en gaz de synthèse, mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène, suivie d'une conversion catalytique en éthanol ou autres carburants liquides. De tels carburants seraient censés réduire les émissions de gaz à effet de serre de 60 % ou plus comparativement à l'essence. Cependant, il n'existe pas actuellement d'usines commerciales fonctionnelles, mais on s'attend à ce que les premières usines soient construites au cours des prochaines années.

Pour l'avenir immédiat, les principales méthodes de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le transport semblent être l'éthanol produit à partir des céréales, le carburant biodiésel produit à partir de végétaux ou d'huiles et de graisses animales et l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules. Selon une étude américaine récente réalisée par la Union of Concerned Scientists, le coût lié à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dues aux véhicules par l'amélioration de leur efficacité pourrait être d'à peine 7 à 33 \$US/tonne d'équivalent-CO₂. L'Agence internationale de l'énergie a estimé que le coût de réduction des émissions de gaz à effet de serre par l'utilisation de biocarburants tels que l'éthanol se situerait entre 100 et 300 \$US/ tonne d'équivalent-CO₂ (gaz à effet de serre). Toutefois, cette étude a été réalisée avant la récente hausse du prix du pétrole brut, qui pourrait avoir modifié le coût de réduction des gaz à effet de serre par l'utilisation des biocarburants. De plus, il s'est révélé jusqu'ici difficile de légiférer, au Canada ou aux États-Unis, en faveur de la production de véhicules à rendement énergétique amélioré.

Des matières biologiques, telles que les fibres de lin et de chanvre, combinées à des plastiques, potentiellement dérivés de matières premières d'origine agricole, pourraient également jouer un rôle dans la production de pièces de carrosseries d'automobile en plastique composite. Elles permettraient de réduire considérablement le poids des véhicules, ce qui améliorerait leur efficacité énergétique. Cette technique commence déjà à être appliquée dans la fabrication d'automobiles en Europe.

Il est important de mentionner que l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules va de pair avec l'introduction des biocarburants dans le système d'alimentation des véhicules de transport. Plus l'efficacité énergétique des véhicules s'améliore, moins il faut de carburant pour parcourir la même distance. Ainsi, moins il faut de carburant par unité de distance parcourue, moins on exerce de pression sur les sols pour produire la matière première qui servira à son tour à produire le carburant renouvelable requis.

Dans d'autres rapports présentés au gouvernement fédéral, on a calculé l'ampleur de la réduction des émissions de gaz à effet de serre consécutive à l'utilisation de l'éthanol et du biodiésel. Dans le cadre de la présente étude, on s'est concentré sur l'éthanol produit à partir de céréales et on a calculé la réduction éventuelle de la consommation de carburant fossile comparativement à l'essence. On a testé différentes méthodes de production de céréales et différentes méthodes de réduction des intrants de carburant fossile dans les usines de traitement. Certaines de ces méthodes de réduction des intrants de carburant

fossile dans la production d'éthanol sont intégrées aux nouvelles usines en voie de construction dans l'Ouest canadien.

Dans les calculs effectués pour cette étude, on a inclus certains intrants énergétiques dans la production et la conversion de produits agricoles en éthanol et en coproduits, qui n'étaient pas inclus dans la plupart des études antérieures. L'omission de ces intrants dans certaines études antérieures a été critiquée dans un article récent par Pimentel et Patzek.

Résultats

Les coûts énergétiques de la production de céréales ont varié considérablement selon la rotation des cultures et l'utilisation de fumier pour répondre à une partie des besoins d'engrais azoté. Les résultats d'une étude à long terme effectuée à Indian Head, en Saskatchewan, à partir de différentes méthodes de culture, de rotation des cultures et de travail du sol, ont été appliqués à un modèle de calcul des coûts énergétiques de l'utilisation du blé CPS comme matière première de conversion en éthanol et en DDGS. Dans l'étude d'Indian Head, les expériences étaient faites à partir du blé de force roux de printemps. Dans la présente étude, on a considéré que le blé CPS, qui a plus de chances d'être utilisé pour la production d'éthanol, avait un rendement supérieur de 20 % ou 30 %, selon les modèles de production agricole utilisés en Saskatchewan. Le blé CPS possède une teneur en amidon plus élevée que le blé de force roux de printemps et conviendrait mieux à la production de l'éthanol.

Certains résultats concernant les avantages d'inclure la luzerne, une légumineuse fourragère, dans la rotation des cultures ont été empruntés à une étude effectuée à Winnipeg, au Manitoba. Les légumineuses, qui comblent une partie de leurs besoins d'engrais azoté en fixant l'azote présent dans l'air, ont tendance à laisser une certaine quantité d'engrais azoté dans le sol après la récolte. Ces matières azotées peuvent être utilisées par une culture subséquente pour répondre en partie à ses besoins d'engrais azoté, réduisant ainsi la quantité d'engrais synthétique énergivore nécessaire à cette culture. La luzerne laisse considérablement plus d'engrais azoté dans le sol que ne le fait une légumineuse telle que le pois.

Les coûts énergétiques de la production d'éthanol à partir de céréales sont constitués par les éléments suivants :

1. les coûts énergétiques de la production de céréale (exprimés en MJ/L d'éthanol produit) +
2. les coûts énergétiques du transport des céréales à l'usine d'éthanol +
3. les coûts énergétiques de la conversion des céréales en éthanol et en DDGS +
4. les coûts énergétiques du transport et de l'entreposage de l'éthanol et de la distribution au détail, moins
5. le crédit énergétique accordé pour les drêches de distillerie avec solubles pour consommation animale (DDGS) produites par la même occasion, moins

6. le crédit énergétique accordé pour le dioxyde de carbone capturé au cours du processus de fermentation des céréales et utilisé pour remplacer le dioxyde de carbone produit pour usage commercial dans les systèmes à carburant fossile.

Il est nécessaire d'accorder un crédit énergétique pour les DDGS, car si on n'utilise pas ce produit comme aliment pour animaux, on devra utiliser d'autres ingrédients semblables, tels que le tourteau de soja et le maïs grain, pour l'alimentation des animaux. Ces autres aliments pour animaux exigent aussi une dépense de carburant fossile pour leur production et leur transformation. Cette énergie consommée doit donc être soustraite des coûts énergétiques totaux du système de production de l'éthanol. Dans cette étude, un crédit de 4,40 MJ/L d'éthanol pour la production des DDGS et la capture du dioxyde de carbone a été déduit des coûts énergétiques totaux du système de production de l'éthanol pour tenir compte de l'énergie liée à ces aliments pour animaux et des effets de substitution du dioxyde de carbone. En excluant toute capture de dioxyde de carbone, on a évalué que le crédit pour les DDGS seulement serait de 2,58 MJ/L d'éthanol produit.

Tous les coûts énergétiques des intrants utilisés dans le cadre de cette étude, tels que l'engrais azoté synthétique, le gaz naturel utilisé comme source d'énergie thermique à l'usine d'éthanol et le carburant diesel utilisé à la ferme comprennent des facteurs destinés à tenir compte de l'énergie utilisée pour les fabriquer et les transporter jusqu'à leur point d'utilisation.

On a calculé que les coûts énergétiques de la composante céréalière des coûts énergétiques totaux de la production d'éthanol à partir du blé CPS variaient de 9,278 MJ/L d'éthanol produit à partir de blé CPS cultivé immédiatement après une autre céréale dans la rotation jusqu'à 3,604 MJ/L d'éthanol produit à partir de blé CPS cultivé immédiatement après la luzerne dans la rotation. Les rendements supérieurs de 20 % ou 30 % du blé CPS par rapport au blé de force roux de printemps ont été testées dans le cadre de la présente étude quant à leurs effets sur les coûts énergétiques de la production d'éthanol. Ce rendement supérieur du blé CPS comparativement au blé de force roux de printemps peut aussi contribuer à réduire les coûts énergétiques de la composante céréalière du système de production d'éthanol comparativement à l'utilisation du blé de force roux de printemps à plus faible rendement.

L'efficacité énergétique des usines d'éthanol s'est améliorée de 2 % par année, selon une étude récente. Dans la présente étude, on a supposé qu'une usine d'éthanol récente consommerait 16,882 MJ de carburant fossile par litre d'éthanol produit. Cette estimation comprend les coûts énergétiques du transport des céréales et du transport de l'éthanol au point d'utilisation, plus la production de l'éthanol et la déshydratation des drêches de distillerie et des solubles.

La présente étude a testé les effets de différentes méthodes de production du blé CPS comme matière première sur le coût énergétique final de production d'éthanol. Les résultats apparaissent au tableau 1. Les effets énergétiques de l'éthanol sont illustrés de deux façons : le rapport entre l'énergie renouvelable produite (éthanol) et l'énergie dérivée de carburant fossile utilisée pour la produire (le rapport énergie produite:énergie

utilisée), et le pourcentage de réduction de l'utilisation de carburant fossile si on utilisait de l'éthanol au lieu de l'essence.

Il faut en moyenne 0,28 MJ de carburant fossile pour extraire du sol le mélange canadien actuel de pétrole brut classique, de pétrole lourd et de sables bitumineux, le raffiner de façon à obtenir 1,00 MJ d'essence, et le transporter jusqu'à la station-service. Cette donnée doit être prise en compte lorsque l'on compare la quantité de carburant fossile nécessaire pour produire de l'éthanol à la quantité totale de carburant fossile comprise dans l'essence, plus le carburant fossile requis pour produire celle-ci.

Tableau 1. Production d'éthanol à haut rendement énergétique à partir du blé CPS. Effets de différentes méthodes de culture du blé CPS et de différents avantages du blé CPS comparativement au blé de force roux de printemps sur le rapport énergie produite:énergie utilisée (énergie renouvelable produite:énergie dérivée de carburant fossile utilisée) de l'éthanol et sur le pourcentage de réduction de la consommation totale de carburant fossile obtenu en remplaçant l'essence par l'éthanol. Données entre parenthèses = sans capture de dioxyde de carbone.

Blé CPS suivant une autre culture dans la rotation	Rendement BCPS/BFRP (%)	Rapport énergie produite:énergie utilisée	Pourcentage de réduction de la consommation totale de carburant fossile obtenu en remplaçant 1 MJ d'essence par 1 MJ d'éthanol
<u>B-BCPS</u>	120	1,08:1 (1,01:1)	27,7 (22,3)
<u>B-BCPS</u>	130	1,19:1 (1,03:1)	34,4 (24,1)
<u>P-BCPS</u>	120	1,16:1 (1,07:1)	32,7 (26,9)
<u>P-BCPS</u>	130	1,20:1 (1,10:1)	34,9 (28,8)
<u>L-BCPS</u>	120	1,43:1 (1,29:1)	45,4 (39,5)
<u>L-BCPS</u>	130	1,46:1 (1,31:1)	46,5 (40,5)

Symboles : BFRP = blé de force roux de printemps; B = culture de céréale précédant le blé CPS dans la rotation; BCPS = blé CPS suivant une autre culture dans la rotation; P = pois précédant le blé CPS dans la rotation; L = luzerne précédant le blé CPS dans la rotation.

L'usine d'éthanol Husky Energy située à Lloydminster serait en mesure de récupérer la vapeur résiduelle et la chaleur industrielle de la centrale de cogénération et des opérations de l'usine de traitement du pétrole lourd et de les utiliser pour remplacer une partie des besoins d'énergie thermique de l'usine d'éthanol. Dans le cadre de la présente étude, on a supposé que le tiers de ces besoins en énergie thermique serait couvert par l'utilisation de ces sources d'énergie. Les économies d'énergie réalisées dans la production d'éthanol se sont révélées considérables et sont illustrées au tableau 2 (en comparaison avec le tableau 1).

L'économie d'énergie réalisée dans une usine d'éthanol en récupérant la chaleur résiduelle d'une autre usine (l'usine de traitement de pétrole lourd) est un exemple

d'écologie industrielle. Elle améliore considérablement les avantages découlant de l'économie de carburant fossile de la production d'éthanol à partir de céréales.

Les données du tableau 1 et du tableau 2 indiquent également que le type de rotation des cultures utilisé par l'exploitant agricole et l'importance des bénéfices de rendement du blé CPS comparativement au blé de force roux de printemps ont des effets sur les économies d'énergie réalisées en optant pour la production d'éthanol à partir du blé CPS.

L'usine d'éthanol Husky Energy produira 130 millions de litres d'éthanol par année. Ceci représente environ 7,9 % (en volume) de la quantité totale d'essence utilisée dans la province. Lorsqu'une obligation de mélanger 10 % d'éthanol à l'essence entrera en vigueur, cette usine de Lloydminster fournira la plus grande partie de l'éthanol requis.

Tableau 2. Usine de production d'éthanol à énergie intégrée et à haut rendement énergétique. Effets sur le rapport énergie produite:énergie utilisée et sur la réduction totale de la consommation de carburant fossile lorsqu'on remplace l'essence par l'éthanol. Effets de différentes méthodes de production du blé comme matière première. Données entre parenthèses = sans capture de dioxyde de carbone.

Blé CPS suivant une autre culture dans la rotation	Rendement BCPS/BFRP (%)	Rapport énergie produite:énergie utilisée	Pourcentage de réduction de la consommation totale de carburant fossile obtenu en remplaçant 1 MJ d'essence par 1 MJ d'éthanol
B-BCPS	120	1,36:1 (1,23:1)	42,6 (36,4)
B-BCPS	130	1,40:1 (1,26:1)	44,2 (38,2)
P-BCPS	120	1,47:1 (1,32:1)	46,9 (40,9)
P-BCPS	130	1,53:1 (1,37:1)	48,9 (42,9)
L-BCPS	120	1,93:1 (1,68:1)	59,5 (53,5)
L-BCPS	130	1,98:1 (1,72:1)	60,5 (54,7)

Le blé CPS utilisé à l'usine Husky Energy de Lloydminster serait un mélange de blé produit selon divers types de rotation des cultures, dont ceux qui sont donnés en exemple aux tableaux 1 et 2. On aurait tendance à favoriser, dans la mesure du possible, les rotations qui réduisent le coût énergétique de la production de blé comme matière première (et conséquemment le coût énergétique de l'éthanol produit). Il importe de noter que le blé CPS cultivé après la luzerne dans la rotation présente des coûts de production considérablement plus faibles que les autres modèles de rotation, en raison de l'économie d'engrais azoté et de pesticides. Le bénéfice net lié à la culture du blé CPS selon cette méthode de rotation a été estimé à plus de 30 \$/acre de plus que pour le blé CPS cultivé après une autre céréale dans la rotation.

Il est possible que certaines usines de transformation de céréales en éthanol ne capturent pas le dioxyde de carbone pour le vendre. On a calculé que cette pratique réduisait de 10 % à 14 % les économies de carburant fossile liées au remplacement de l'essence par

l'éthanol. Néanmoins, on a conclu qu'on obtenait quand même des réductions substantielles de la consommation totale de carburant fossile.

Orientations futures

Orientations futures dans le domaine de la transformation de céréales en éthanol

À la suite de l'analyse énergétique de l'intégration d'une usine de transformation céréales-éthanol à un parc d'engraissement et à un nouveau processus de production de biogaz et de biofertilisant, on a découvert qu'une telle intégration entraînait une réduction importante des quantités de carburant fossile requis pour produire l'éthanol. Un nouveau processus de production de biogaz (un mélange de méthane et de CO₂) à partir du fumier d'un parc d'engraissement a été mis au point par l'Alberta Research Council. Ce processus produit également un engrais solide et de l'eau qui peut être recyclée. Ce processus est mis à l'épreuve à un parc d'engraissement en Alberta. Une usine de transformation céréales-éthanol serait en mesure d'acheminer les drêches de distillerie avec solubles (DDGS) à l'état humide au bétail au parc d'engraissement. On épargnerait ainsi les coûts énergétiques considérables liés à la déshydratation des DDGS pour la vente hors site. Le fumier serait traité pour produire des biogaz et des biofertilisants. Les biogaz seraient utilisés pour répondre aux besoins en énergie thermique de l'usine d'éthanol. Les résultats des analyses énergétiques apparaissent au tableau 3.

Tableau 3. Rapport énergie produite:énergie utilisée de l'éthanol produit dans un système intégré usine d'éthanol/biogaz/parc d'engraissement. Effets de la rotation des cultures, différents rendements du blé CPS comparativement au blé de force roux de printemps, et utilisation du fumier comme fertilisant de remplacement partiel. Réduction totale de la consommation de carburant fossile lorsqu'on remplace l'essence par l'éthanol. Situation sans capture du dioxyde de carbone.

Rotation des cultures ou utilisation de fumier	Rendement BCPS/BFRP (%)	Rapport énergie produite:énergie utilisée	Pourcentage de réduction de la consommation totale de carburant fossile obtenu en remplaçant 1 MJ d'essence par 1 MJ d'éthanol
B-BCPS	120	1,59:1	51,0
B-BCPS	130	1,65:1	52,7
B-BCPS (20 % élém. nutritifs du fumier)	120	1,67:1	53,1
P-BCPS	120	1,75:1	55,5
A-BCPS	120	2,45:1	68,1

Selon les projections, la réduction totale de gaz à effet de serre (GES) par un tel processus serait considérable. Il a été démontré que l'utilisation des DDGS comme aliment du bétail améliore l'efficacité alimentaire et, conséquemment, réduit les éructations de méthane chez les animaux. La récupération du fumier par l'usine de biogaz

réduirait la perte du méthane dû à la décomposition du fumier. Recycler les éléments nutritifs du fumier comme fertilisant solide réduirait la perte de ces éléments nutritifs. L'importante réduction de consommation de carburant fossile consécutive à l'utilisation d'éthanol provenant de telles usines en remplacement d'une partie de l'essence actuellement utilisée entraînerait également une réduction des gaz à effet de serre. Le processus devrait intéresser particulièrement l'Alberta, qui compte de nombreux parcs d'engraissement. L'Alberta compte également un nombre croissant d'usines de traitement de sables pétrolifères, qui sont responsables d'importantes émissions de gaz à effet de serre. Elle aura donc besoin de projets de compensation de gaz à effet de serre. Ces systèmes intégrés d'usine d'éthanol/biogaz/parc d'engraissement pourraient peut-être se révéler intéressants à cet effet.

Procédés de production d'éthanol à partir de la lignocellulose

Un certain nombre d'études ont démontré que la transformation des déchets ligneux, de l'écorce de bois et des résidus de récolte (lorsqu'il est acceptable d'en retirer une partie au-delà des besoins de la protection des sols) en éthanol ou en d'autres biocarburants liquides peut réduire substantiellement les émissions de gaz à effet de serre. Ces matières premières sont disponibles en beaucoup plus grandes quantités que les céréales, au Canada et dans le reste du monde. Le projet d'usine d'éthanol de Nipawin prévoit utiliser un système de gazéification-conversion catalytique pour produire de l'éthanol à partir de sciure, d'écorce et de paille de lin.

Enjeux liés à la controverse aliment-carburant

On a estimé qu'environ un million de tonnes de blé seraient disponibles pour la conversion en éthanol et en aliment pour animaux (DDGS) chaque année dans l'ensemble du Canada. Cette quantité représenterait environ 4,3 % de la production annuelle moyenne de blé au Canada. Environ 38 % du blé ainsi converti en éthanol serait reconverti en aliment pour animaux (DDGS). La perte nette d'aliment et de valeur nutritive de l'aliment pour animaux serait donc de 2,7 %. Il importe de noter qu'une bonne partie de la production canadienne de blé est utilisée actuellement pour l'alimentation des animaux. Dans l'éventualité de futures pénuries alimentaires et de hausses de prix des céréales à l'échelle mondiale, bon nombre d'usines de transformation de céréales en éthanol pourraient ajouter, préalablement à la fermentation, des étapes de séparation qui permettraient de produire, par exemple, du gluten de blé, de la farine de blé enrichie et une farine de blé de qualité inférieure pouvant quand même être convertie en éthanol. Une telle séparation se pratique déjà à la bioraffinerie de céréales de Red Deer, en Alberta.

Parmi les études examinées, un certain nombre signalaient que le principal moyen pour réduire la faim dans le monde consistait à aider les producteurs agricoles des pays du tiers monde (représentant environ 50 % des personnes les plus démunies) à accroître substantiellement (et à faible coût) leur propre production alimentaire. La présente étude énumère brièvement un certain nombre de façons de réaliser cet objectif.

Autres options en matière d'énergie renouvelable

L'étude examine brièvement d'autres options de production d'énergie renouvelable en milieu agricole. L'énergie éolienne semble prometteuse et pourrait générer un nouveau bénéfice net considérable pour les agriculteurs dont les terres sont utilisées pour la production éolienne d'électricité.

Remerciements

L'auteur remercie les personnes suivantes, qui ont révisé une version antérieure de ce document de discussion :

Ann Coxworth, Saskatchewan Environmental Society, Saskatoon, Saskatchewan
David Hanly, Saskatchewan Industry and Resources, Regina, Saskatchewan
Sheldon Hill, Saskatchewan Research Council, Saskatoon, Saskatchewan
Keith Hutchence, Saskatchewan Research Council, Regina, Saskatchewan
Mark Stumborg, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Swift Current, Saskatchewan
Bob Zentner, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Swift Current, Saskatchewan

Table des matières

Chapitre 1. Aperçu des enjeux liés à l'énergie verte	1
1. Efficacité énergétique et utilisation des carburants fossiles pour produire de l'énergie renouvelable	1
2. Autres enjeux liés à la production de biocarburants	2
2.1. Effets environnementaux	2
2.2. Opposition aliment-carburant	2
2.3. Avantages économiques pour les agriculteurs	2
2.4. Coûts économiques	2
3. Objectifs d'amélioration de la production et utilisation dans le domaine du transport	3
4. Réponse aux critiques de Pimentel et Patzek	3
5. Différences entre le Canada et les États-Unis en matière de développement des biocarburants liquides renouvelables	4

6. Bilans énergétiques et réductions des émissions de gaz à effet de serre découlant de l'utilisation de l'éthanol produit à partir de céréales ou de matières lignocellulosiques telles que le bois ou la paille	4
6.1. Crédits énergétiques liés aux coproduits obtenus par la fermentation de céréales	5
6.2. Prise en compte de tous les coûts énergétiques liés à la production d'éthanol et de DDGS à partir de la fermentation de céréales	6
6.3. Production d'éthanol à partir de matières lignocellulosiques	6
6.3.1. Production d'éthanol par voie de fermentation	6
6.3.2. Production d'éthanol par voie de gazéification	7
6.4. Situation de l'Ouest canadien. Production d'éthanol à partir de céréales. Intégration avec l'élevage. Utilisation comme élément d'une stratégie de réduction des émissions de GES dues à l'industrie de l'élevage	8
7. Biocarburants et amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules	9
8. Autres sources d'énergie renouvelable applicable au transport.	
Potentiel de l'énergie éolienne et de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau à l'électricité d'origine éolienne	10
9. Sources énergétiques multiples pour l'avenir	11
10. Le concept de bioraffinage	11
11. Certains bioproduits peuvent la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre plus que les biocarburants	12
12. Coûts et disponibilités des carburants fossiles	13
13. Différentes voies de production d'éthanol à partir de diverses matières premières ..	15
14. Controverse aliment-carburant	16
15. Estimations des ressources totales de biomasse lignocellulosique disponibles au Canada pour la production d'énergie et de bioproduits	17
16. Captage de l'énergie solaire par photosynthèse et comparaison avec d'autres méthodes	18
Intégration de l'électricité solaire comme source d'énergie dans le domaine du transport	19
Hydrogène produit à partir de l'énergie solaire	20
17. Les émissions de gaz à effet de serre imputables à l'agriculture au Canada. Rôles potentiels pour les coproduits de l'éthanol	20

18. Problèmes économiques de l'agriculture dans l'Ouest canadien	22
19. Pollution de l'air découlant de la production et de l'utilisation de l'éthanol comme carburant de transport	22
20. Pollution de l'eau découlant de la production et de l'utilisation de l'éthanol	22
Chapitre 2. Coûts énergétiques de la production d'éthanol et de coproduits à partir de céréales. Méthodes de réduction des coûts énergétiques	24
1. Objectifs de ce chapitre	24
Production d'éthanol actuelle et prévue en Saskatchewan	24
1.1. Effet de la rotation et de la sélection des cultures	25
1.2. Effets, en termes d'économie d'énergie, de l'intégration d'une usine d'éthanol avec une usine de traitement du pétrole lourd	26
1.3. Effet de l'intégration d'une usine de biogaz avec une usine d'éthanol et un parc d'engraissement sur la quantité totale de carburant fossile utilisée pour produire de l'éthanol	26
1.4. Effets énergétiques liés à la capture du dioxyde de carbone et de la vente de celui-ci en remplacement du dioxyde de carbone produit à partir de carburant fossile	26
1.5. Récupération de produits destinés à l'alimentation humaine dans les céréales avant leur fermentation pour production d'éthanol	26
2. Analyses énergétiques de l'éthanol et de coproduits obtenus par la transformation de céréales	27
2.1. Coûts énergétiques liés à la production de céréales en Saskatchewan	27
Coûts énergétiques liés à la culture des matières premières agricoles	28
2.2. Coûts énergétiques de la transformation des céréales en éthanol, avec DDGS et capture du dioxyde de carbone	29
3. Résultats de l'analyse des méthodes possibles de culture agricole et des effets de l'amélioration des processus sur les coûts énergétiques liés à la production d'éthanol à partir du blé	31

3.1. Coûts énergétiques du blé CPS. Effets de la rotation des cultures et de l'utilisation du fumier et différents rendements du blé CPS comparativement au blé de force roux de printemps	31
a) Blé CPS suivant la culture d'une autre céréale dans la rotation	31
b) Coûts énergétiques de la culture du blé CPS suivant une récolte de légumineuse dans la rotation	32
c) Coûts énergétiques de la culture du blé CPS suivant une récolte de luzerne dans la rotation	32
d) Coûts énergétiques de la culture du blé CPS avec un apport de fumier correspondant à 20 % des besoins d'engrais azoté	33
e) Coûts énergétiques de la culture du blé CPS par ensemencement direct à long terme	32
f) Sommaire des effets de différentes méthodes de culture sur les coûts énergétiques du blé CPS utilisé dans la production d'éthanol	34
3.2. Coûts énergétiques du transport des céréales au centre de traitement, de la conversion en éthanol, avec DDGS et capture du CO ₂ , et coûts d'entreposage et de transport de l'éthanol jusqu'à la station-service	34
a) Coûts énergétiques de l'éthanol produit à partir du blé CPS cultivé après une autre céréale dans la rotation	36
b) Effet de la culture d'une légumineuse avant le blé CPS dans la rotation	36
c) Effet de la non-capture du dioxyde de carbone sur le bilan énergétique	36
d) Effet de la réduction de la quantité de gaz naturel et d'électricité requise dans l'usine de transformation	36
e) Effet de l'utilisation de la vapeur et de la chaleur résiduelles d'une raffinerie de pétrole/usine de traitement voisine pour réduire les besoins d'énergie thermique d'une usine de fabrication d'éthanol à partir de céréales	37
f) Coûts énergétiques de la production d'éthanol par une usine à haut rendement énergétique jumelée à un parc d'engraissement et une usine de biogaz utilisant le fumier comme matière première	38
4. Exemples de systèmes de culture qui améliorent le bénéfice net des exploitants agricoles tout en réduisant le coût énergétique des céréales produites	40
5. Conclusions	41
6. Références	43