

INRA

ADEME

**Une approche économique, énergétique et environnementale du
gisement et de la collecte des pailles et d'une utilisation pour les
filères éthanol**

Contrat ADEME 01.01.037

Contrat INRA A01805

Nathalie GAGNAIRE, Benoît GABRIELLE, Jeanne DA SILVEIRA
UMR INRA INA P-G Environnement et Grandes Cultures

Jean-Claude SOURIE, Laure BAMIERE
UMR INRA INA P-G Economie Publique

Avec les collaborations d'ARVALIS et de la FNCUMA

MAI 2006

SOMMAIRE

RESUME.....	4	
Objectifs:	7	
Partie 1 : Evaluation des émissions directes au champ par le modèle de culture-bilan environnemental CERES.....	10	
1. Les scénarios simulés	10	
2. Résultats des simulations	12	
2.1. Effets du milieu et des pratiques sur les rendements pailles et grains	12	
2.2. Effet de la fréquence d'exportation des pailles sur les flux simulés	14	
Partie 2 : Analyse du cycle de vie de la filière bio-éthanol de blé	21	
1. Introduction	21	
2. Méthodologie	21	
2.1. Définition du système.....	22	
2.2. Inventaire des entrées/sorties	24	
2.3. Quantification des impacts	25	
3. Résultats	27	
4. Analyse de sensibilité.....	31	
4.1. Sensibilité à la valeur fertilisante des pailles.	31	
4.2. Sensibilité à l'allocation massique des flegmes.	32	
4.3. Sensibilité à la distance entre l'unité de stockage de la paille et l'usine de transformation.	34	
5. Analyse d'incertitudes.....	34	
6. Conclusion.....	37	Supprimé : 36
Partie3 : Analyse économique de l'offre de paille et de quelques valorisations énergétiques.	38	Supprimé : 36
1. Gisement français en paille de céréales.....	38	Supprimé : 36
1.1. Evaluation du gisement en 1973 (Marsal, Sourie)	38	Supprimé : 36
1.2. Nouvelle évaluation du gisement	39	Supprimé : 36
1.3. Paille et pénurie fourragère	40	Supprimé : 36
1.4. Importance du gisement énergétique contenu dans la paille.....	40	Supprimé : 36
1.5. Le gisement en paille dans six départements céréaliers du Grand bassin Parisien 41		Supprimé : 36
1.6. Situation au Danemark	42	Supprimé : 36
2. Les coûts de collecte	43	Supprimé : 36
2.1. Méthode.....	43	Supprimé : 36
2.2. Données de base	43	Supprimé : 36
2.3. Définitions des coûts:	44	Supprimé : 36
2.4. Un exemple de coût élémentaire	46	Supprimé : 36

2.5. Coût de récolte la paille au Danemark	47	Supprimé : 36
2.6. Prix théorique	48	Supprimé : 36
3. Optimisation de la collecte de paille à l'échelle régionale	51	Supprimé : 36
3.1. Définition	51	Supprimé : 36
3.2. Exemple de coûts de collecte en Nord Picardie et Champagne-Ardenne	51	Supprimé : 36
4. Minimisation des coûts de collecte et localisation optimale des utilisateurs de la paille		
54		Supprimé : 36
4.1. Première approche, le prix de la paille en andains est exogène et constant.	54	Supprimé : 36
4.2. Deuxième approche le prix de la paille en andains est endogène, prise en compte du comportement à offrir.....	56	Supprimé : 36
5. Economie de quelques filières énergétiques fondées sur la paille	59	Supprimé : 36
5.1. La paille source d'énergie pour une unité d'éthanol de blé.	59	Supprimé : 36
5.2. La production d'éthanol par hydrolyse enzymatique de la paille	62	Supprimé : 36
6. Conclusions	64	Supprimé : 36
Bibliographie	67	Supprimé : 36
ANNEXES	70	Supprimé : 36
Figures, Tableaux, graphiques et annexes.....	85	Supprimé : 36

RESUME

L'utilisation de la biomasse a connu ces dernières années un très important regain d'intérêt aux Etats-Unis et en Europe, qui s'est manifesté par la publication de plusieurs documents institutionnels (livrets blancs et vert sur l'énergie en Europe, Executive Order 13134 du Pdt B. Clinton "Developping and promoting biobased products and bioenergy »), ainsi que le financement de gros programmes de recherche en amont et d'études de faisabilité en aval. La filière bio-éthanol d'amidon ou de ligno-cellulose est considérée comme possédant un potentiel de développement majeur.

Dans ce contexte, le présent projet propose une approche intégrée, énergie, environnement, micro-économie sur l'évaluation de nouvelles filières de production d'éthanol et des usages énergétiques des pailles, qui n'avaient pas encore été comparées (co-génération, éthanol par hydrolyse enzymatique).

Dans les deux premières parties du projet nous nous focalisons sur conséquences agronomiques et environnementales d'une valorisation énergétique des pailles de blé dans la conversion de l'amidon de blé en bio-éthanol. L'évaluation environnementale est conduite sous la forme d'une analyse de cycle de vie, intégrant les différentes étapes de production du bio-éthanol : production du blé au champ, transport des pailles et grains vers l'usine, et conversion en éthanol.

Deux scénarios sont étudiés pour l'alimentation énergétique de l'usine : dans la référence celle-ci comprend 100% de gaz naturel (ressource fossile), tandis que dans le deuxième scénario la paille de blé fournit 50% des besoins énergétiques. La zone d'étude est le Nord-Est du bassin Parisien, centrée autour d'une usine de production de bio-éthanol. Les émissions environnementales des deux scénarios sont estimées par l'intermédiaire d'un modèle de culture pour la partie production et au champ, afin d'appréhender la variabilité du milieu (sol, climat), et à l'aide de diverses sources pour le reste du cycle de vie.

L'étude se décompose donc en deux parties, qui montrent :

1. Un effet relativement faible de l'exportation des pailles sur les sorties environnementales et agronomiques des systèmes étudiés. Les effets les plus marquants sont :
 - la diminution du rendement du blé avec l'augmentation de la fréquence de prélèvement, avec pertes de l'ordre de 0,5 à 1,5 quintaux de MS/tonne de pailles exportée.
 - la part importante du stockage du carbone des pailles restituées (0,05 à 0,1

tonne C / tonne de pailles) dans le bilan effet de serre de la phase agricole

- les effets légèrement positifs ou nuls de l'exportation des pailles sur les pertes de nitrate, les émissions d'ammoniac et d'oxyde nitreux
2. Un bilan très positif de l'utilisation énergétique des pailles dans la production d'éthanol dans l'analyse de cycle de vie du bio-éthanol d'amidon de blé, du point de vue de l'utilisation de ressources non-renouvelables et de l'effet de serre. Les autres impacts étudiés (eutrophisation, acidification, pollution photochimique) sont très peu affectés.

Dans les limites de l'étude (nombre partiel d'impacts étudiés et de facteurs d'impact, fiabilité et représentativité des simulations au champ), nous concluons à une bonne efficacité environnementale de l'utilisation des pailles, qui apparaît comme une solution prometteuse pour limiter les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agro-industriel.

Dans la troisième partie nous évaluons le gisement potentiel en paille dans les six départements de l'étude (Ardennes, Marne, Aisne, Somme, Oise, Seine et Marne), les coûts de collecte et la localisation optimale des sites de transformation. Enfin deux évaluations d'utilisations énergétiques des pailles sont proposées :

l'utilisation des pailles comme source d'énergie pour les besoins d'une usine d'éthanol de blé, la transformation des pailles en éthanol par hydrolyse enzymatique.

Pour étudier et optimiser le coût de collecte de la paille, une étude détaillée des opérations techniques a été réalisée par la FNCUMA, ARVALIS et l'INRA. Un modèle conçu avec EXCEL permet de calculer les coûts de collecte et de paramétrer de nombreuses données techniques ainsi que les distances de collecte. Ces coûts élémentaires sont ensuite utilisés par un modèle régional de minimisation des coûts d'approvisionnement qui permet de délimiter les aires de collecte des unités de transformation et de les localiser de manière optimale sur la base d'une maille géographique cantonale. Le comportement à offrir des producteurs de céréales qui implique une augmentation des prix de la paille en andains en fonction des quantités collectées a été introduit dans le modèle d'optimisation des collectes.

Dans cette région le coût de la paille (stricto sensu, c'est-à-dire sans profit des acteurs) varie entre 39 et 57 €/t si la distance moyenne de collecte passe de 20 km à 150 km. Toutefois ce sont la récolte et le stockage qui induisent les coûts les plus importants.

Si 50% de la paille régionale agronomiquement disponible est récoltée, le prix « théorique de la paille » (profit des acteurs compris) se situe autour de 60 €/t. Il passe à 70 €/t si toute la paille disponible d'une région est collectée. Ce mécanisme de l'offre implique une régulation

du marché de la paille au niveau régional. Les utilisateurs ont intérêt à s'entendre afin d'éviter des situations de concurrence locale qui feraient flamber le prix de la paille et qui auraient pour résultat de dissuader les investisseurs.

Deux utilisations énergétiques de pailles ont été étudiées, la co-production de chaleur et d'électricité pour une usine d'éthanol de 100000 tonnes et la production d'éthanol par hydrolyse enzymatique (Unité de 2700 hl/j). Dans le premier cas étudié, l'utilisation énergétique des pailles améliore fortement le bilan énergétique et le bilan « gaz à effet de serre » de la filière mais induit des investissements importants qui pénalisent le coût de l'éthanol. Dans le deuxième cas, l'utilisation de paille à la place du gaz naturel fait s'accroître le coût de l'éthanol de 29,3 à 35,7 euros/hl. Les coûts micro-économiques de l'éthanol produit par hydrolyse enzymatique des pailles ne sont pas pour l'instant très probants. Ils sont estimés à 53 euros/hl alors que le coût de l'éthanol de blé se situe autour de 30- 36 euros/hl.

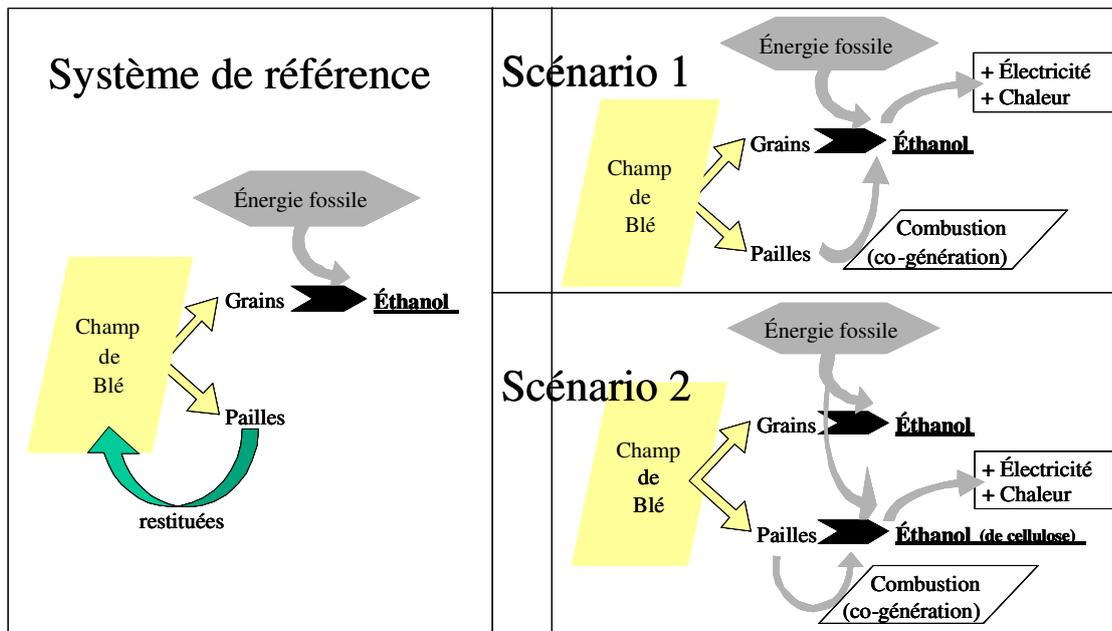
La valorisation non alimentaire des pailles soulève quelques problèmes qui ne manqueront pas de se poser si la mobilisation des ressources ligno-cellulosiques devient importante dans le futur :

- L'évolution du prix de la paille en fonction de la demande (disposition à offrir des producteurs),
- Les effets en retour de la valorisation non alimentaire des pailles sur l'offre de céréales, sur les revenus des utilisateurs traditionnels de paille et sur la sécurité fourragère des éleveurs en cas de sécheresse,
- Les impacts sur les coûts cultureux d'une surexploitation non alimentaire de la paille,
- La manière de réguler le marché de la paille au niveau régional,
- La complémentarité entre la paille et les co-produits de la filière bois (à plus long terme avec les cultures dédiées).

Objectifs:

L'objectif des deux premières parties de cette étude est d'évaluer les conséquences agronomiques et environnementales d'une valorisation énergétique des pailles de blé. Ces résultats sont conduits sous la forme d'une analyse de cycle de vie (ACV) de la filière bio-éthanol de blé, qui est réalisée en différentiel entre deux scénarios pour la production du bio-éthanol de l'amidon de blé. Dans le scénario de référence, l'usine de production de bio-éthanol utilise uniquement de l'énergie non renouvelable (gaz naturel utilisé pour générer de la chaleur et de l'électricité), tandis que dans l'autre scénario une chaudière à pailles fournit la moitié des besoins énergétiques de l'usine par co-génération de chaleur et d'électricité. Les filières étudiées et les systèmes correspondants sont présentés sur la Figure 1. Celle-ci fait apparaître un troisième scénario (scénario 2) dans lequel la paille de blé est utilisée comme substrat pour la production de bio-éthanol par hydrolyse enzymatique. Etant donné le caractère prospectif de cette voie de conversion, nous avons décidé de ne pas le considérer dans notre analyse.

Figure 1. Filières étudiées dans le présent projet.



Les systèmes étudiés se résument donc à la référence (système **S1** dans la suite) et au scénario 1 (système **S2**).

La Figure 1 explicite également la séparation entre des étapes de type industrie / transport (synthèse et mise à disposition des intrants, machines, conversion des grains récoltés en

éthanol), et une phase propre à l'agriculture de production en plein champ. Cette séparation du système est associée à deux types de déterminisme des émissions. Celles de la première partie sont qualifiées d'« indirectes » (parce qu'elles n'ont pas lieu sur le site de production agricole), et relèvent de l'application classique de l'ACV en milieu industriel (Hunt et al., 1974). A l'inverse, les émissions en plein champ (« directes » sur la figure) sont fortement influencées par la variabilité du milieu. Il est donc difficile de les relier directement à un niveau d'intrants utilisé sur la parcelle agricole, et il est impératif de les approcher par une modélisation qui explicite les effets du sol et du climat. Une deuxième différence intervient à ce niveau-là entre les deux systèmes, puisqu'en termes de pratiques agronomiques les pailles sont restituées au sol dans le système de référence, et exportées dans l'autre.

Nous avons donc décomposé ce travail en deux étapes successives :

- 1) Evaluation des émissions directes au champ par l'intermédiaire d'un modèle de culture simulant les cycles eau-C-N à l'échelle du champ cultivé.
- 2) Réalisation d'une analyse de cycle de vie sur la filière bio-éthanol de blé. Cette analyse s'appuie en partie sur les résultats obtenus par CERES pour les émissions directes.

La troisième partie de l'étude concerne l'analyse économique de l'offre de paille et de quelques valorisations énergétiques. A l'exception du bois utilisé depuis longtemps, la paille a été la première biomasse qu'on a tenté de mobiliser dans les années 80 pour la production d'énergie thermique à petites échelles : chauffage des ménages agricoles, séchage des produits agricoles (maïs, luzerne). C'est à cette époque que Marsal, Sourie, Gorse (1) ont réalisé la première estimation du gisement national en paille, disponible sans danger agronomique. Ce gisement a été alors estimé à 4,1 millions de tonnes soit environ 16% de la paille produite. En 1986, Requillart (2) a analysé les différentes filières de valorisation énergétique des pailles ainsi que les compétitions entre les différents usages à l'échelle d'un canton.

La valorisation énergétique des pailles ne s'est jamais développée en France contrairement au Danemark. Dans ce pays, la présence de très nombreux réseaux de chaleur, co-génération de l'électricité, a favorisé le développement de l'usage thermique de la paille et du bois (4). En France, le contexte était moins favorable en raison de la prédominance du chauffage individuel et de la production d'électricité d'origine nucléaire. En outre, la baisse du prix du pétrole et des choix politiques privilégiant le développement des biocarburants et de la valorisation thermique du bois, plus facile à mettre en œuvre, expliquent en grande partie le désintérêt progressif pour la paille amorcé depuis la fin des années 80.

Aujourd'hui en 2006, cette ressource est remise à l'honneur en raison du renchérissement du

pétrole, de la lutte contre les gaz à effet de serre et des perspectives offertes par les ressources ligno-cellulosiques pour la production de biocarburants. Il y aurait aujourd'hui en France selon l'AGPB (Association Générale des Producteurs de Blé), seulement trois installations de chauffage à la paille (ou mixtes bois paille), de faible puissance, moins de 5MW. La paille peut non seulement être une source d'énergie thermique utilisable de façon décentralisée mais elle peut aussi apporter une production supplémentaire de biocarburants sans utiliser de terres agricoles. Elle pourrait ainsi, avec le bois, faciliter la réalisation des objectifs ambitieux de production de biocarburants dans le futur (7 à 10% des besoins en carburants fossiles) en limitant la concurrence entre alimentaire et non alimentaire.

Plus de 25 ans après les premiers travaux sur la paille, nous proposons à nouveau une évaluation du gisement national, certes plus sommaire qu'en 1976. Une étude plus détaillée est faite sur six départements céréaliers : Somme, Oise, Marne, Ardennes, Aisne, Seine et Marne en raison des projets de valorisation des pailles qui démarrent dans ces départements. Une étude détaillée des coûts de collecte est présentée ; elle a été réalisée en collaboration avec ARVALIS et la FNCUMA ; des outils permettant d'optimiser ces coûts et la localisation des sites d'utilisation ont été conçus. Enfin deux évaluations d'utilisations énergétiques des pailles sont proposées :

- l'utilisation des pailles comme source d'énergie pour les besoins d'une usine d'éthanol de blé,
- la transformation des pailles en éthanol par hydrolyse enzymatique.

Il existe bien d'autres possibilités de transformer la paille en énergie, notamment par les voies thermo-chimiques sur lesquelles on fonde beaucoup d'espoirs. Ces filières font l'objet aujourd'hui de recherches financées notamment par le PNRB (Programme National de Recherche sur la Biomasse).

Partie 1 : Evaluation des émissions directes au champ par le modèle de culture-bilan environnemental CERES.

L'objectif de cette partie est d'évaluer les émissions directes :

- dans l'absolu pour la production des grains de blé transformés en bio-éthanol,
- en différentiel entre les systèmes à pailles enfouies et pailles exportées,
- et à l'échelle de la région d'étude, soit 4 départements du Nord-Est du bassin Parisien: Somme, Oise, Aisne, Marne.

Pour cela nous utilisons un modèle de culture simulant les cycles eau-C-N à l'échelle du champ cultivé: CERES (Gabrielle, 2002). Les flux prédits par le modèle concernent les pertes en nitrate (NO_3^-) par lixiviation verticale, les émissions à l'atmosphère d'ammoniac (NH_3) et d'oxyde nitreux (N_2O), et le bilan de carbone (C) du système sol-végétation.

1. Les scénarios simulés

Pour rendre compte de la variabilité des conditions pédo-climatiques sur la zone d'étude, nous avons construit 4 scénarios (1 par département) représentant les grands types de sols de l'ensemble de la région d'étude : sols bruns et bruns calcaires, sols lessivés dégradés, rendzines, et sols alluviaux (Tableau 1). Nous avons pris pour chaque classe un sol représentatif issu d'études antérieures menées avec CERES (Tableau 2). Les types de sols sont ensuite combinés de façon aléatoire avec les sites climatiques (ce qui donne en principe $4 \times 4 = 16$ combinaisons sol/climat).

Tableau 1 Pourcentage d'occupation de la surface agricole utile par les différentes classes pédologiques de sols dans les 3 régions concernées par l'étude (source : Service Infosol, INRA Orléans).

Types de sols	Régions		
	Champagne-Ardenne	Picardie	Ile de France
Sols bruns et bruns calcaires	45,3	19,9	14,0
Sols lessivés dégradés	11,5	2,3	21,0
Rendzines	29,7	23,6	13,8
Sols alluviaux	10,8	11,8	8,9
Sols lessivés	1,8	39,8	23,5

Tableau 2 Propriétés des sols utilisés dans les simulations pour représenter les différentes classes de sols de la région d'étude.

	Propriétés	Localisation	Référence
Sols bruns et bruns calcaires	<i>Texture limoneuse ; pH=7.8, %C=1.2 ; %CaCO3=1</i>	Mons-en-Chaussée (80)	(Gabrielle et Kengni, 1996)
Sols lessivés dégradés	<i>Texture argilo-limoneuse ; pH=6.9 ; %C=1.1, %CaCO3<1</i>	Feucherolles (78)	(Gabrielle et al., 2004)
Rendzines	<i>Texture argilo-limoneuse ; pH=8.7, %C=1.9 ; %CaCO3=75</i>	Le Rafidin (51)	(Gabrielle, 2002)

Les données climatiques utilisées sont des séries historiques de longue durée (trente ans), provenant de stations départementales. Le Tableau 3 indique les caractéristiques des différents sites, qui montrent pour les deux premiers une différence essentiellement en termes de pluviométrie totale annuelle.

Enfin les situations pédo-climatiques sont combinées avec différents types de rotations. Les rotations retenues sont : Blé-maïs, Betterave-blé-blé, Colza-blé-blé, Colza-blé-escourgeon, Betterave-blé-escourgeon, Maïs ensilage – blé, Maïs grain – blé, et monoculture de blé. Certaines sont peu probables et marginales dans la zone d'étude (comme celles qui intègrent du maïs), mais elles visent à couvrir l'ensemble du spectre en termes de fréquence de retour du blé dans l'assolement – et donc d'exportation des pailles. Cette fréquence va de 100% pour une mono-culture de blé jusqu'à 25% pour une rotation quadriennale. Les itinéraires techniques pratiqués dans les différentes rotations sont indiqués dans l'Annexe 1.

Dans un premier temps, par souci de simplification seulement deux sites climatiques et deux sols ont été étudiés : la rendzine et le sol brun, sur les séries climatiques de la Marne et de la Somme.

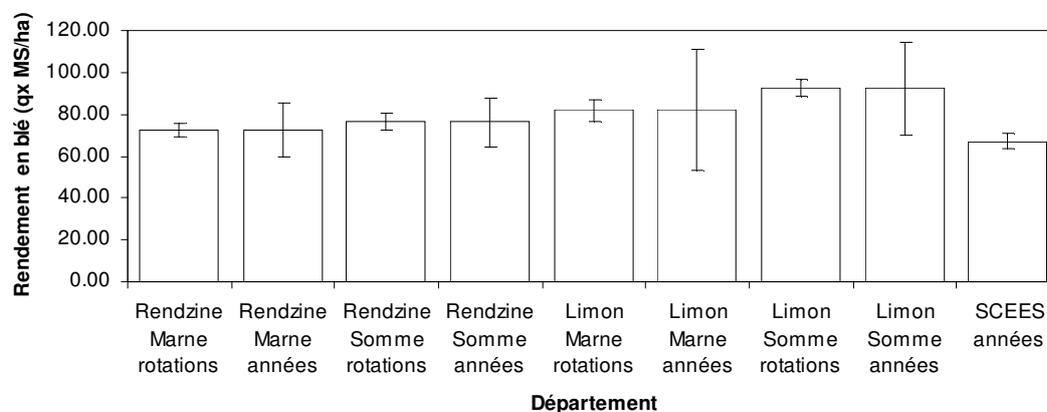
Tableau 3. Normales climatiques pour les sites simulés.

Site	Pluviométrie	Evapo- Tranpiration Potentielle	Température de l'air moyenne	Rayonnement journalier moyen
	mm/an		°C	MJ/m ² /jour
Abbeville (80)	774	637	10,3	10,65
Fagnières (51)	636	694	10,4	11,55
Mons (60)	627	665	10,6	10,73

2. Résultats des simulations

2.1. Effets du milieu et des pratiques sur les rendements pailles et grains

Figure 2. Effet du type de sol et du site climatique sur le rendement en blé simulé par CERES. Les bâtons correspondent aux moyennes calculées sur l'ensemble des rotations et des années climatiques pour chaque combinaison sol/climat. Deux séries de barres d'erreur sont présentées : la première correspond à l'écart-type sur les différents types de rotations combinées à différentes fréquences d'exportation des pailles (n=20), et la deuxième à la moyenne des écarts-types liés à la variabilité inter-annuelle du climat (n=31). La dernière valeur provient des statistiques du SCEES pour la région Champagne-Ardenne, sur la période 1980-1995.



Les sorties du modèle en termes de productivité ou de pertes environnementales montrent un effet prépondérant de la variabilité climatique, les autres facteurs (site climatique, type de sol et de rotation) ayant un effet similaire. C'est illustré pour les rendements du blé par la

Figure 2, qui montre que la variabilité inter-annuelle du climat induit des écarts-types quatre fois plus importants que ceux résultant du choix des rotations. La comparaison avec les données de production commerciale sur la région Champagne-Ardenne provenant du SCEES montre toutefois que l'effet de cette variabilité inter-annuelle est largement sur-estimée. En effet l'écart-type calculé sur les différentes années de récolte est également 3 fois plus faible que celui donné par la simulation. Dans l'absolu, les niveaux de rendement simulés sont également sur-estimés, ce qui est prévisible étant donné que le modèle ne tient pas compte des maladies, et des pertes diverses (effet des fourrières, pertes à la récolte, etc...). Il faut aussi tenir compte du fait que les statistiques de production lissent l'effet des facteurs sol-climat. Sur les quatre combinaisons sol-climat testées ici, l'amplitude des rendements moyens est de 20 quintaux/ha, les deux extrêmes étant constitués par la rendzine et le climat de la Marne, et le limon avec le climat de la Somme. Nous faisons pour l'instant l'hypothèse que ces 2 situations représentent les extrêmes des situations que l'on peut rencontrer dans la zone d'étude.

Les tonnages de pailles exportées par an varient entre 1 et 4.6 t MS/ha, entre les différentes rotations et combinaisons sols/climats. Les niveaux de production les plus élevés correspondent à une monoculture de blé avec exportation tous les ans (Figure 3).

L'influence du site climatique est discutée ci-dessous, en comparant les sorties obtenues pour le même type de sol (rendzine ou limon) dans la Marne et la Somme.

Pour le limon profond

Le climat de la Marne induit une diminution de rendement de 10.5 qx en moyenne. Le drainage diminue également de 132 mm, ce qui correspond à peu près à la différence de pluviométrie annuelle moyenne entre les deux séries de données météorologiques (138 mm, Tableau 1). Cela entraîne une augmentation moyenne des pertes de nitrates de 14.6 Kg N/ha pour les rotations de référence (sans exportation de pailles). L'exportation des pailles entraîne une lixiviation plus faible, et cette baisse est plus importante qu'avec le climat de la Somme.

Les émissions de N₂O restent faibles et les variations en fonction du climat également (+0.14 Kg N/ha avec le climat de la Marne). La volatilisation d'ammoniac est plus importante dans les simulations avec le climat de la Marne. La simulation maïs grain - blé donne des résultats parfois aberrants, qu'il conviendra de revoir (pertes d'azote très élevées sur la période 1998-2002). Le bilan effet de serre reste plus intéressant avec ce même climat.

Pour la rendzine :

Le drainage reste très important dans le cas d'une simulation avec le climat d'Abbeville (Somme). Les variations en fonction des exportations sont du type de celles simulées pour le

sol et le climat de la Marne. Les rendements obtenus sont inférieurs en moyenne de 3.4 qx à ceux correspondant au climat de la Marne. La part des nitrates lixiviés est augmentée par la pluviométrie importante du climat de la Somme (entre 6.2 et 9.4 Kg N/ha). Les émissions de N₂O restent faibles et ne sont quasiment pas influencées par le changement de données météorologiques et la volatilisation d'ammoniac est un peu augmentée. Le bilan de effet de serre est faiblement positif pour les rotations de référence (Figure 3).

2.2. Effet de la fréquence d'exportation des pailles sur les flux simulés

Les différences entre les rotations sont plus importantes que celles entre deux types de gestion de paille pour la même rotation. Globalement, le rendement des rotations avec exportation est inférieur à celui sans exportation de pailles, en raison d'une plus importante minéralisation nette, excepté pour les scénarios avec un colza comme tête de rotation dans la Marne. Les pertes de rendement sont de l'ordre de 0,5 à 1,5 quintaux de MS/tonne de pailles exportée. Cela correspond à une valeur fertilisante de 1,5 à 4,5 kg N/tonne de pailles, valeur inférieure au contenu total en azote des pailles (de l'ordre de 6 kg N, voir Tableau 6).

La Figure 4 montre que les exportations de paille ont peu d'effets sur les émissions directes. Les pertes en nitrate sont plutôt plus faibles quand on exporte les pailles, avec un différentiel de 1 à 2 kg N/an entre une exportation à 0 et 100%. La littérature sur le sujet rapporte un effet d'immobilisation de l'azote minéral du sol par les pailles de céréales, qui contribue à diminuer le lessivage de nitrate dans l'hiver qui suit (Garnier et al., 2003), (Silgram et Chambers, 2002). Néanmoins cet effet n'est pas toujours observé (Thomsen et Christensen, 1998), et susceptible de s'inverser également observé avec des résidus plus riches en azote (eg, pailles de blé sur-fertilisé - (Mitchell et al., 2001), ou après plusieurs années d'incorporation (Catt et al., 1998).

Les flux de N₂O simulés sont faibles en valeur absolue, et varient entre 0,15 et 0,60 kg N-N₂O/ha/an. Les valeurs faibles correspondent au sol de rendzine, dont le pH alcalin n'est pas favorable à la production nette de N₂O (Hénault et al., 2001). Les flux ont tendance à baisser légèrement quand les pailles sont exportées, avec une proportion de 0.1 à 0.25 kg N/tonne de pailles. Il y a peu d'indications dans la littérature sur l'effet des pailles sur les émissions de N₂O, mais elles soulignent l'interaction avec la fertilisation : la restitution des pailles augmente le potentiel de dénitrification du sol, et dans une moindre mesure la production de N₂O (Avalakki et al., 1995), mais réduit ce même potentiel en cas d'apport concomitant d'engrais minéraux ou organiques (Cai et al., 2001 ; Hao et al., 2001) - ce qui n'est toutefois pas le cas ici. Si l'on agrège ces émissions avec le bilan de carbone du sol pour calculer un impact 'effet de serre' des rotations, on trouve néanmoins que les rotations sans exportation conservent un certain avantage (représentant en moyenne une tonne de kg équivalent CO₂), du

fait de l'alimentation du carbone organique du sol par les pailles. Sur 30 ans, le modèle simule un potentiel de stockage des pailles d'environ 0,05 à 0,1 tonne C / tonne de pailles, ce qui est plutôt dans la fourchette haute des valeurs trouvées dans la littérature, qui est de 0,01 à 0,04 tonne C/tonne de pailles après 30 ans (Soussana et al., 2002). Le type de rotation apparaît toutefois déterminant sur la seule fréquence d'exportation.

La volatilisation d'ammoniac augmente avec le taux d'exportation des pailles dans la Marne, avec des écarts de l'ordre de 1 à 2 kg N-NH₃/ha/an, soit 5 à 10% des flux absolus.

La tendance s'inverse dans le cas de la Somme, avec des pentes plus fortes en fonction de la fréquence d'exportation (bas de la Figure 4

). Ces deux cas traduisent des différences d'équilibre entre l'effet d'immobilisation de l'azote de l'engrais apporté par les pailles (qui réduit la volatilisation) et celui d'une minéralisation d'azote plus forte (qui augmenterait la volatilisation). La seule référence trouvée dans la littérature souligne une absence d'effet de l'exportation des pailles sur les pertes d'ammoniac après apport d'urée (Tian et al., 2001).

Au niveau du bilan hydrique, l'exportation des pailles conduit à une légère augmentation du drainage pour climat de la Marne, sauf pour la monoculture de blé. Dans la Somme on observe l'effet inverse (le drainage est moins important dans les rotations avec exportation des pailles), et l'effet est d'autant plus important que la fréquence d'exportation est élevée.

Enfin l'effet de la position des prélèvements de paille dans les rotations a été testé avec la monoculture de blé, et s'est avéré négligeable.

Le

Tableau 4 résume les émissions retenues pour l'insertion dans l'Analyse de Cycle de Vie
(Partie 2 : Analyse du cycle de vie de la filière bio-éthanol de blé).

Supprimé : ¶
-----Saut de page-----
¶
Tableau 4

Tableau 4. Emissions directes retenues pour les deux Départements, pour la rotation colza-blé-blé, avec trois systèmes : pas d'exportation de pailles (S1), exportation une année sur 3 (S2-1), exportation 2 années sur 3 (S2-2). Les émissions sont moyennées sur l'ensemble des années climatiques simulées.

Site	Bilan 'effet de serre'	dont N ₂ O kg éq. C-CO ₂ /ha	de Ammoniac kg N-NH ₃ /ha	Nitrate kg N-NO ₃ /ha	Rendements	
					Grains Tonnes de MS/an	Pailles (exportées) Tonnes de MS/an
Système de référence (S1)						
Marne	-800	78	16,2	5,5	7,12	0
Somme	-860	210	19,2	48,4	9,52	0
Système avec exportation de pailles une année sur 3 (S2-1)						
Marne	-680	78	17,0	5,0	7,14	1,05
Somme	-660	200	17,0	44,0	9,25	1,34
Système avec exportation de pailles deux années sur 3 (S2-2)						
Marne	-560	78	18,3	4,4	7,22	2,54
Somme	-600	190	15,1	39,3	9,07	2,56

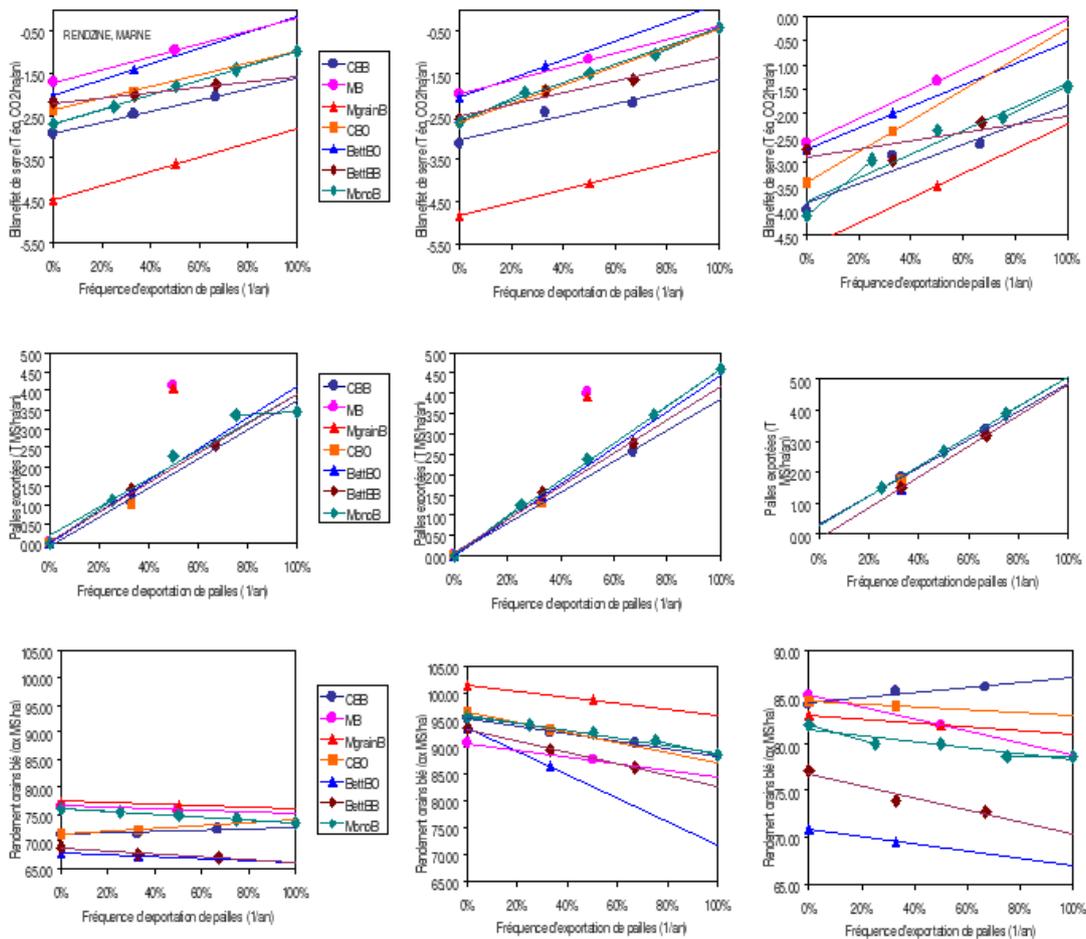
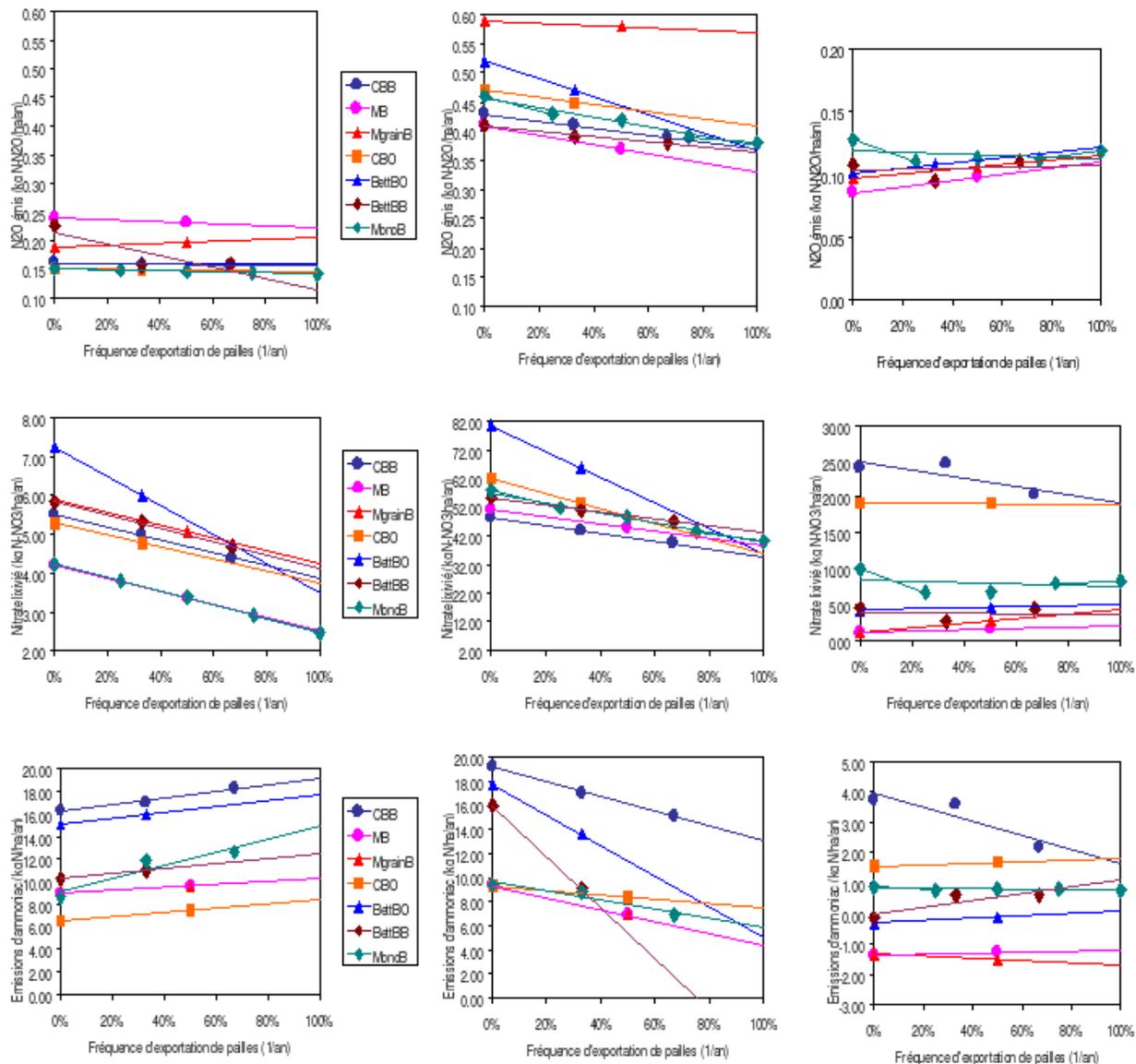


Figure 3. Effet de la fréquence d'exportation des pailles sur le bilan des gaz à effet de serre (haut), les quantités de pailles exportées par an (milieu), et les rendements de la culture de blé (bas) dans la Marne (gauche) et la Somme (droite), pour les différentes rotations. Le bilan effet de serre, exprimé en tonne d'équivalent CO₂, est la somme de deux termes : les émissions d'oxyde nitreux (compté positivement), et les variations de stock de carbone du sol

Figure 4. Effet de la fréquence d'exportation des pailles sur les pertes en N₂O (haut), nitrate (milieu), et les émissions d'ammoniac (bas) dans la Marne et la Somme, pour les différentes rotations. Les flux sont exprimés en kg N/ha/an.



Partie 2 : Analyse du cycle de vie de la filière bio-éthanol de blé

1. Introduction

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est définie ainsi dans la norme ISO 14040 : "compilation and evaluation of the inputs, outputs and the potential environmental impacts of a product system throughout its life cycle".

Une ACV s'attache ainsi à réaliser un bilan de l'ensemble des flux entrants et sortants à chaque étape de la vie d'un produit (extraction des matières premières, transports, production du produit, utilisation, fin de vie) afin d'obtenir un inventaire global dont l'analyse et l'interprétation permettent de poser des conclusions solides.

L'analyse des inventaires de Cycle de Vie permet, dans un premier temps, d'identifier les étapes qui contribuent le plus à l'impact total du système.

Dans un second temps, des calculs d'impacts potentiels sur l'environnement (acidification atmosphérique, effet de serre, eutrophisation...) peuvent être conduits en utilisant les résultats de l'inventaire.

L'analyse des résultats de ces calculs permet de hiérarchiser l'importance des flux qui y contribuent (émissions atmosphériques de NOx, SOx, émissions aqueuses de nitrates, phosphates, etc...).

2. Méthodologie

La méthode générale appliquée pour la réalisation d'une analyse de cycle de vie se décompose en quatre étapes :

1) La première consiste à appliquer les prescriptions méthodologiques générales de la norme ISO 14040 au secteur étudié, et notamment à définir les objectifs et le champ de l'étude (unité fonctionnelle).

2) La seconde consiste à collecter les données nécessaires au calcul de l'inventaire, à réaliser un modèle du cycle de vie du produit et à calculer son inventaire par des bilans énergétiques et des bilans de matière.

3) La troisième consiste à interpréter les résultats de l'étude en termes d'impacts potentiels sur l'environnement.

4) La dernière est essentiellement une étape d'aide à la décision, au cours de laquelle les capacités de simulation sont utilisées (analyses de sensibilité, scénarios) pour répondre aux objectifs fixés.

2.1. Définition du système

La notion importante de cette première étape est celle "d'unité fonctionnelle", qui permet de comparer les différents produits rendant un service similaire. Cette unité est définie avec précision à partir de l'objectif de l'étude, de son utilisation et de l'usage des produits. Elle permet de prendre en compte à la fois une unité de produit et une unité de fonction.

Ensuite il faut définir le système étudié et le découper en sous-systèmes moins complexes aboutissant à la production d'une unité fonctionnelle.

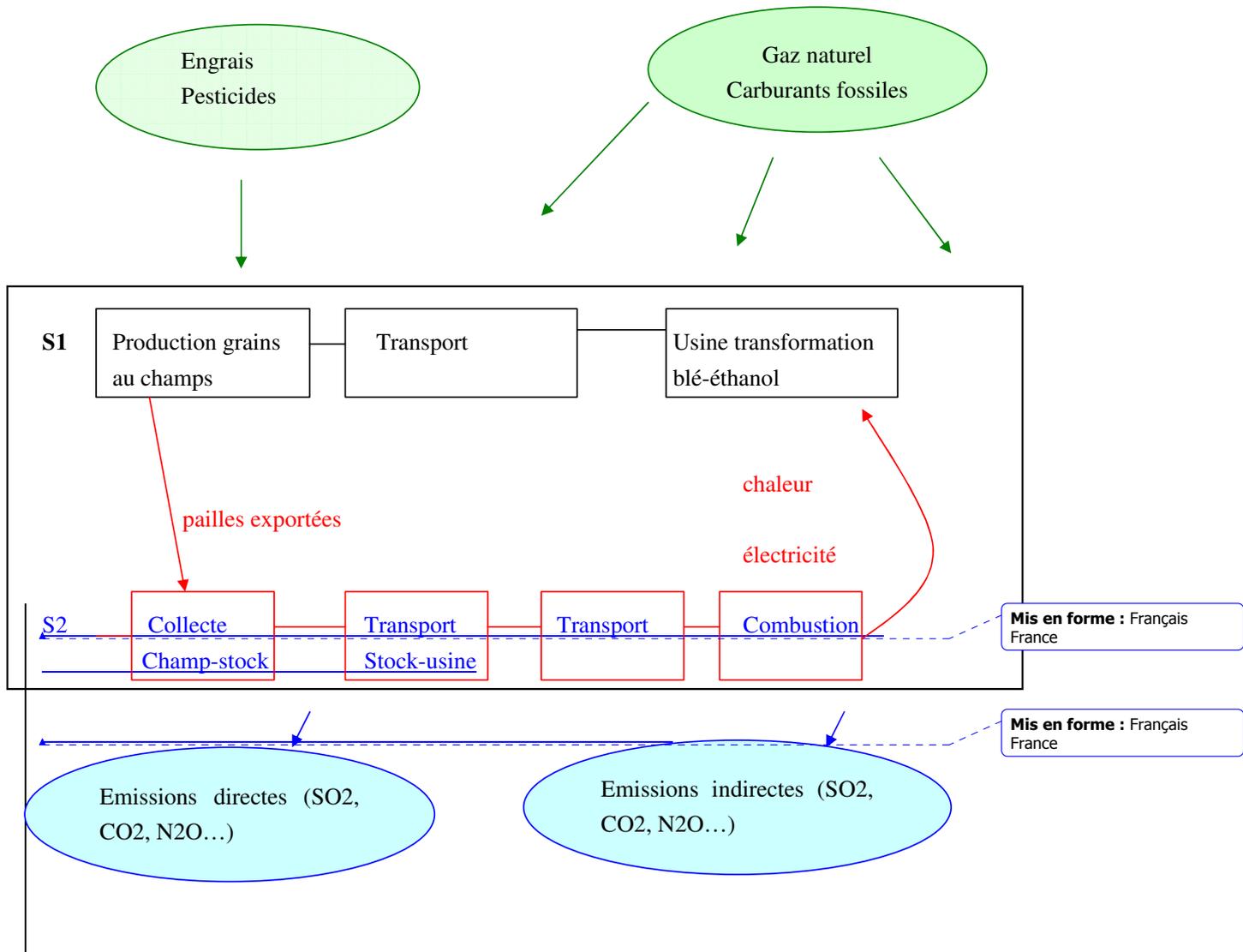
Dans le cadre de cette étude l'unité fonctionnelle choisie est le **litre d'éthanol produit à partir de blé**.

Les systèmes étudiés sont détaillés dans la Figure 5, qui montre leurs différents sous-systèmes : champ-transport du champ à l'unité de stockage-transport du stock à l'unité de transformation-unité de transformation. Dans le système S2, la paille fournit 50% des besoins énergétiques de l'usine, en énergie primaire (Tableau 5).

Tableau 5. Quantités d'énergie mobilisées par l'usine de production d'éthanol, par litre d'éthanol produit, dans les 2 systèmes étudiés. Les consommations sont exprimées en volumes par source d'énergie, ainsi qu'en énergie primaire.

Type d'énergie	S1	S2	S1 / Energie primaire		S2 / Energie primaire	
			MJ	Dont non-renouvelable	MJ	Dont non-renouvelable
Gaz naturel (Nm ³)	0,16	0,09	6,4	6,4	3,6	3,6
Electricité auto-produite (kWh)	0,94	0,94				
Pailles (kg)	0	0,21	0		3,2	
Total			6,4	6,4	6,8	3,6

Figure 5. Représentation schématique des systèmes et sous-systèmes étudiés. La différence entre le système de référence (S1) et le système avec valorisation énergétique des pailles (S2) se situe au niveau des modules en rouge.



La paille peut être considérée comme un co-produit de la culture de blé, soit restituée au champ soit valorisée par combustion.

Afin de prendre en compte ce co-produit une valeur fertilisante lui est affectée selon le tableau ci dessous (SOLAGRO, 2001):

Tableau 6. Valeur fertilisante de la paille.

Elements minéraux	Teneur par tonnes de Matière sèche	Quantité pour 3.5 tonnes	
		En éléments (kg)	En unités fertilisantes
Azote N	6 kg	21 kg	21 N
Phosphore P	0.8 kg	2.8 kg	6 P2O5
Potassium K	10 kg	35 kg	42 K2O
Magnésium Mg	0.5 kg	1.75 kg	2.9 Mgo
Calcium Ca	3 kg	10.5 kg	15 CaO
Soufre S	1.6 kg	5.6 kg	14 SO3
Cuivre	2.8 kg	9.8 kg	
Manganèse	25 kg	87.5 g	
Zinc	9 g	31.5 g	
Fer	154 g	539 g	

La paille est donc un résidu de culture riche en carbone et pauvre en azote. Le rapport C/N de la paille est voisin de 100.

Dans un premier temps, l'analyse du cycle de vie a été réalisée sur la rotation colza/blé/blé dans les départements de la Marne et de la Somme, avec trois fréquences d'exportation des pailles : pas d'exportation (référence, S1), exportation une ou deux fois par rotation (système noté S2-1 et S2-2, respectivement).

Ramenées sur une base annuelle, les quantités d'exportation des pailles permises par ces derniers sont de 1,45 tonnes et 2,7 tonnes de paille par hectare, respectivement.

2.2. Inventaire des entrées/sorties

Pour procéder aux bilans de matière et d'énergie, il faut analyser les sous-systèmes définis précédemment et dont les entrants et sortants sont connus (cf Figure 5).

Les entrants (quantités de matières premières et énergies consommées) sont comptabilisés, ainsi que les sortants (les rejets dans l'air, dans l'eau ou dans le sol, ainsi que les volumes de déchets solides) pour tout ou partie du système étudié. Toutes les données sont ensuite ramenées à l'unité fonctionnelle.

Les sources de données sont indiquées dans le Tableau 7.

Tableau 7. Source des données techniques et environnementales sur les différents sous-systèmes étudiés.

Sous-système	Composante	Source
Production agricole	Emissions indirectes (intrants, machines, etc...)	(Reinhardt, 2000) ; (Lambert, 1996)
	Emissions directes (C-N)	Simulations CERES (Partie 1)
Transport champ – usine (pailles), via stockage intermédiaire		Données FNCUMA (ce rapport) ; (Reinhardt, 2000)
Transport champ – usine (grains)		(Ecobilan, 2002); (Reinhardt, 2000)
Production de bio-éthanol	Système de référence	(Ecobilan, 2002); (Reinhardt, 2000)
	Chaudière à pailles	(Reinhardt, 2000) ; (SOLAGRO, 2001) ; scénario énergétique fourni par BENP (ce rapport)

2.3. Quantification des impacts

L'objectif de cette troisième phase est d'une part de classer les différents entrants et sortants des systèmes étudiés en fonction de leurs impacts et d'autre part d'évaluer quantitativement les impacts pour chaque problème environnemental (réchauffement global, acidification de l'atmosphère, épuisements des ressources naturelles, pollutions diverses, nuisances, ...).

Le calcul des impacts environnementaux dans une Analyse de Cycle de Vie est la phase la plus complexe et la plus importante. Chaque fragment de l'itinéraire technique doit être traduit en émissions directes et indirectes puis converti en contribution aux impacts. Parmi les principales difficultés et risques d'erreurs figurent les unités. En fonction de l'élément de l'inventaire, la quantité doit être exprimée dans une unité cohérente au contenu de la base de données des émissions. Typiquement, une phase de transport sera exprimée en km, t.km ou heure selon le véhicule utilisé. Ce travail demande donc une extrême rigueur, des vérifications systématiques, et une attention particulière pour les modifications de l'itinéraire technique ou une mise à jour de la base de données.

La le calcul de l'ACV est fait en trois phases, à l'intérieur d'un feuille de calcul Excel:

l'itinéraire technique est traduit, en référence à une base de données, en émissions directes et indirectes puis les impacts sont calculés à partir des émissions avec des facteurs d'impact.

La paille est considérée comme un coproduit du système de production des grains de blé, et on ne lui impute pas d'émissions environnementales spécifiques, au-delà des différences d'émissions entre les systèmes S1 et S2. Ces différences recouvrent d'une part, les différentiels d'émissions entre les rotations avec ou sans exportation de pailles (

Tableau 4), et d'autre part entre les systèmes une allocation en unités fertilisantes lui est affectée (cf. 2.1).

Supprimé : ¶
.....Saut de page.....
¶
Tableau 4

Compte tenu du fait que les rotations avec exportation de pailles génèrent plus de pailles qu'il n'en est nécessaire pour convertir l'ensemble des grains produits sur la parcelle, nous considérons que les systèmes S2 sont constitués de 2 sous-parcelles pour la production agricole : une qui est menée comme S1 (pas d'exportation de pailles), et la deuxième sur laquelle on exporte les pailles à fréquence variable, et en quantité suffisantes pour permettre la conversion en éthanol de l'ensemble de la production des 2 sous-parcelles.

Enfin, pour être homogène avec l'étude réalisée par Ecobilan sur le même site de production (usine BENP d'Origny Sainte-Benoîte), nous avons attribué un facteur d'allocation massique de 43% aux flêgmes (produit de l'étape de distillation) au cours de l'étape de conversion, le reste étant attribué aux drèches et solubles concentrés valorisés en alimentation animale.

3. Résultats

Tous les résultats qui suivent sont ramenés au litre d'éthanol produit. Le Tableau 8 compare les émissions totales des différents systèmes, pour le cas de la Marne, tandis que la Figure 6 montre leur ventilation par sous-systèmes (production agricole de grains et paille de blé, transport vers l'usine, transformation en éthanol, combustion de la paille).

Les gains principaux liés à l'utilisation des pailles correspondent à l'économie d'énergie non renouvelable et la pollution photochimique (avec des écarts relatifs d'environ 20% sur l'ensemble de la chaîne), puis sur l'impact effet de serre (14%) et pollution photochimique (3%). Les impacts 'eutrophisation' et 'acidification' présentent eux un léger désavantage (de 3% à 6%). Il n'y a pas de différences marquées entre les fréquences d'exportation des pailles (S2.1 comparé à S2.2). Enfin il est intéressant de rapporter ces différences à la quantité de pailles introduites dans S2 en substitution au gaz naturel. On constate qu'on économise l'équivalent du pouvoir calorifique inférieur (PCI) des pailles (15 MJ/kg), et que les économies de CO₂ correspondent à 100% du potentiel théorique de substitution (53 g CO₂/MJ de PCI), et à la moitié du carbone des pailles¹. Les différences entre les systèmes S1 et S2 tiennent :

1. A l'économie d'énergie fossile dans l'étape de conversion en bio-éthanol pour **l'effet de serre**, économie qui est près de 20 fois supérieure aux coûts supplémentaires induits par la chaudière et à pailles et leur collecte. Le même ratio d'applique au différentiel lié au stockage du carbone des pailles enfouies et à leur valeur fertilisante

¹ En supposant une teneur en élément carbone de 40% dans les pailles.

(dans S1).

2. A l'effet positif de l'exportation des pailles sur les émissions d'ammoniac au champ pour **l'acidification** et **l'eutrophisation** (pour cette dernière catégorie, l'effet négatif de l'exportation des pailles sur les pertes en nitrate joue de façon marginale). Cet effet est combiné à des émissions de composés eutrophisants dans l'air (NO_x, NH₃) plus importantes lors de la combustion des pailles comparées à celle du gaz naturel.

Le Tableau 9 montre les impacts environnementaux calculés pour le sol de limon profond dans la Somme. Les différences sont assez faibles avec le cas de la Marne (Tableau 8), néanmoins on voit que le bilan d'énergie et l'impact effet de serre sont moins favorables aux systèmes S2 que dans la Marne. Ceci est dû à des rendements grains plus élevés dans la Somme (

Tableau 4), qui améliore l'efficacité énergétique de la phase agricole. Le différentiel est en revanche plus favorable aux pailles pour les impacts eutrophisation et acidification, étant donné que, contrairement au cas de la Marne, l'exportation des pailles a pour effet de diminuer les pertes de nitrate et d'ammoniac depuis la parcelle agricole.

Supprimé : ¶
-----Saut de page-----
¶
Tableau 4

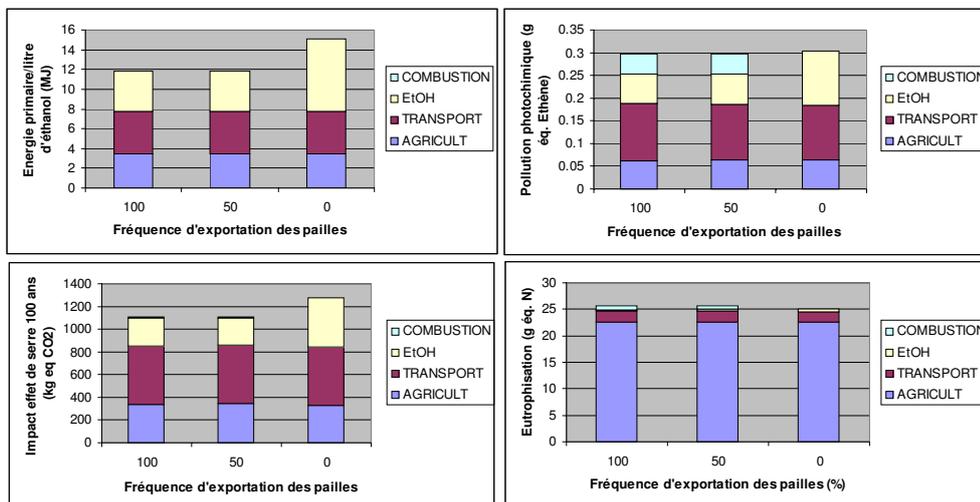
Tableau 8. Impacts calculés pour les systèmes S1 (référence) et S2, dans la Marne sur sol de rendzine. Deux fréquences d'exportation des pailles sont simulées pour S2:50 et 100% des pailles produites, correspondant à S2.1 et S2.2. Pour les systèmes S2, les flux sont exprimés en différentiel par rapport à S1. L'unité fonctionnelle est le litre de bio-éthanol. La dernière colonne exprime les différences entre S1 et S2 (moyenne de S2.1 et S2.2) par kg de pailles utilisées.

Type d'impact	Unité	S1	S2.1	S2.2	S2/kg de pailles
Energie Primaire non renouvelable	MJ	13.0	3.2	3.2	15.08
Effet de serre 100 ans	g éq. CO2	977.1	165.1	167.8	779.96
Acidification	g eq. SO2.	9.6	-0.7	-0.7	-3.12
Eutrophisation	g eq. NO3	24.0	-0.7	-0.6	-3.06
Pollution photochimique	Ethène	0.3	0.01	0.01	0.02

Tableau 9. Même tableau que le précédent, pour le sol de limon profond dans la Somme.

Type d'impact	Unité	S1	S2.1	S2.2	S2/kg de pailles
Energie Primaire non renouvelable	MJ	12.3	3.2	3.2	14.92
Effet de serre 100 ans	g éq. CO2	918.4	160.1	165.1	761.95
Acidification	g eq. SO2.	7.9	-0.3	-0.3	-1.21
Eutrophisation	g eq. NO3	40.8	0.8	0.9	4.11
Pollution photochimique	g eq. Ethène	0.2	0.00	0.00	0.02

Figure 6. Effet de la fréquence d'exportation des pailles sur les impacts des systèmes S1, S2.1 (50% d'exportation), et S2.2, en ce qui concerne les besoins en énergie primaire non renouvelable, l'effet de serre, la pollution photochimique, et l'eutrophisation. Les émissions sont ventilées entre les différentes phases du cycle de vie de l'éthanol, pour le cas de la Marne. Légende des phases : AGRICULT=production agricole ; TRANSPORT=transport champ-usine des pailles et des grains ; EtOH=conversion en éthanol des grains dans l'usine ; COMBUSTION=combustion des pailles et élimination des cendres.



4. Analyse de sensibilité

4.1. Sensibilité à la valeur fertilisante des pailles.

La variation de la valeur fertilisante des pailles a été faite sur la teneur en azote par tonne de matière sèche dans un intervalle de 0 à 6 kg d'azote par tonne de matière sèche.

Les résultats obtenus sur différents impacts montrent très peu de sensibilité à cette valeur fertilisante des pailles. (Tableau 10).

Tableau 10: Impacts calculés pour différentes valeurs fertilisantes des pailles (VF) pour le système S2.2 (fréquence d'exportation des pailles de 100% des pailles produites), dans la Marne sur sol argilo-limoneux. Les flux sont exprimés en différentiel par rapport à S1 (système de référence sans export de paille). L'unité fonctionnelle est le litre de bio-éthanol.

	VF0	VF1	VF2	VF3	VF4	VF5	VF6
Energie Primaire non renouvelable (MJ)	3.22643	3.22571	3.22500	3.22428	3.22357	3.22285	3.22213
Effet de serre 100 ans (g eq CO2)	145.89953	145.78412	145.66870	145.55329	145.43787	145.32246	145.20704
Acidification (g eq SO2)	-0.38207	-0.38260	-0.38313	-0.38366	-0.38419	-0.38472	-0.38525
Eutrophisation (g eq NO3)	0.24476	0.24416	0.24356	0.24296	0.24236	0.24176	0.24116
Pollution photochimique (g eq ethene)	0.00529	0.00528	0.00527	0.00526	0.00525	0.00525	0.00524

4.2. Sensibilité à l'allocation massique des flegmes.

Selon l'étude ADEME/DIREM (Ecobilan, 2002), lors de la première distillation (=flegme), 43% de la paille est transformée en alcool, le résidu constituant les drèches. Dans cette partie, on mesure la sensibilité des impacts à cette allocation massique pour des valeurs de 60%, 80% et 100%.

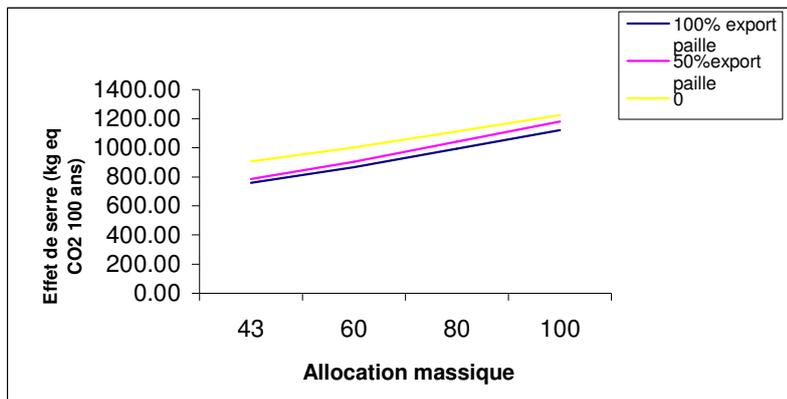
Le Tableau 10 présente les résultats des impacts pour une rotation colza-blé-blé (Mons) et montre que les impacts sont sensibles à cette allocation massique.

Toutefois, le différentiel entre le scénario de référence (pas d'export de pailles) et les scénarii avec export de paille est faible pour chaque allocation sauf pour l'impact réchauffement climatique à 100 ans» (Figure 7).

Tableau 11 : Résultats des impacts en fonction de la variation de l'allocation massique des flegmes pour une rotation colza-blé-blé dans la Marne (Mons en Chaussée).

	Allocation flegme				Export paille (%)
	43	60	80	100	
Effet exportation sur énergie primaire (MJ)	9.36	10.53	11.91	13.28	100
	9.36	10.53	11.90	13.27	50
	12.59	13.76	15.14	16.52	0
Effet de serre (g eq CO2 sur 100 ans)	759.67	867.51	994.38	1121.2	100
			1041.5	1180.1	
			1000.4	1225.2	
(g eq CO2 sur 100 ans)	785.12	902.94	5	6	50
			1	1	
			1	1	
Pollution photochimique (g eq ethene)	0.24	0.26	0.28	0.31	100
	0.24	0.26	0.28	0.31	50
	0.24	0.26	0.29	0.31	0
Eutrophisation (g eq NO3)	23.28	31.66	41.52	51.39	100
	24.00	32.66	42.86	53.05	50
	23.52	32.21	42.42	52.64	0
Acidification (g eq SO2)	4.54	5.66	6.98	8.30	100
	4.62	5.77	7.13	8.49	50
	4.15	5.32	6.69	8.06	0

Figure 7 : Représentation du réchauffement global sur 100 ans pour les trois scénarii en fonction de l'allocation massique en drèches



4.3. Sensibilité à la distance entre l'unité de stockage de la paille et l'usine de transformation.

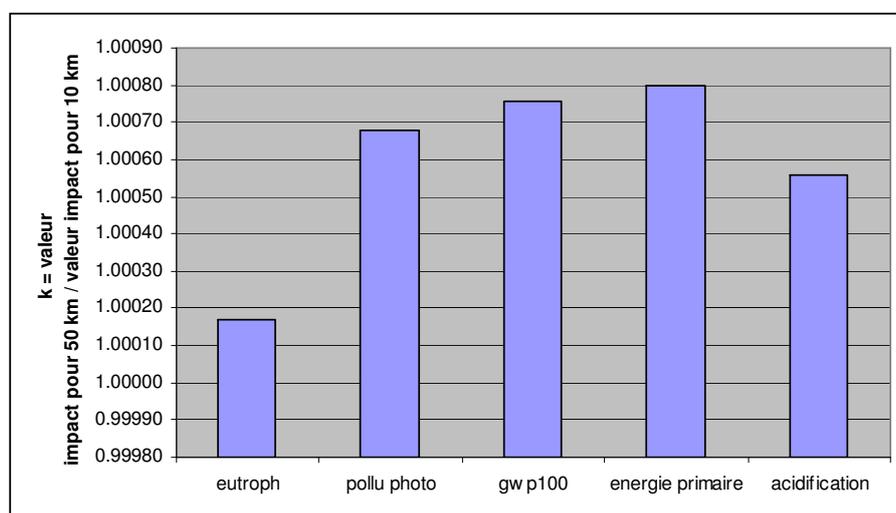
La sensibilité des impacts est ici mesurée par rapport au facteur distance de transport des pailles du site de stockage jusqu'au site de transformation, la variation se faisant sur un intervalle compris entre 10 kilomètres et 50 kilomètres.

La Figure 8 présente les écarts relatifs sur les différents types d'impact lorsque la distance de transport est multipliée par 5.

On voit nettement que les impacts environnementaux sont peu sensibles à la distance, les coefficients applicables entre les impacts pour une distance de 10 km et les impacts pour une distance de 50 km sont très proches de la valeur 1.

Ces résultats appuient ceux obtenus par les économistes pour lesquels le facteur distance ne joue qu'à qui joue à quelques pour-cents sur le bilan d'énergie.

Figure 8 : Représentation des coefficients applicables par impact lorsque la distance de transport des pailles jusqu'à l'unité de transformation est multiplié par 5.



5. Analyse d'incertitudes

Principe :

On rentre la variance estimée par le modèle CERES sur les émissions directes et sur le rendement dans l'ACV. Les variables, dont la variance a été calculée, sont les émissions de NH₃, de N₂O et de NO₃⁻. Elles sont distribuées selon une loi normale ou une loi plus proche de la réalité (exemple loi loglogistic pour les émissions en N₂O)

Résultats :

Ils sont présentés dans la Figure 9, et montrent un effet majeur de la variabilité inter-annuelle du climat sur les sorties de l'ACV. L'écart-type sur les impacts qui en résulte est en effet souvent supérieur à 50% de l'impact moyen pour la phase agricole (Figure 9). Ceci souligne le poids des émissions au champ dans le bilan et de l'incertitude auxquelles ces émissions sont soumises du fait des aléas climatiques. Sur le plan de la méthode Monte Carlo, la forme des distributions choisies pour bruitez les émissions (normale, log-normale, ou uniforme) a en revanche peu d'impacts sur la variance des sorties.

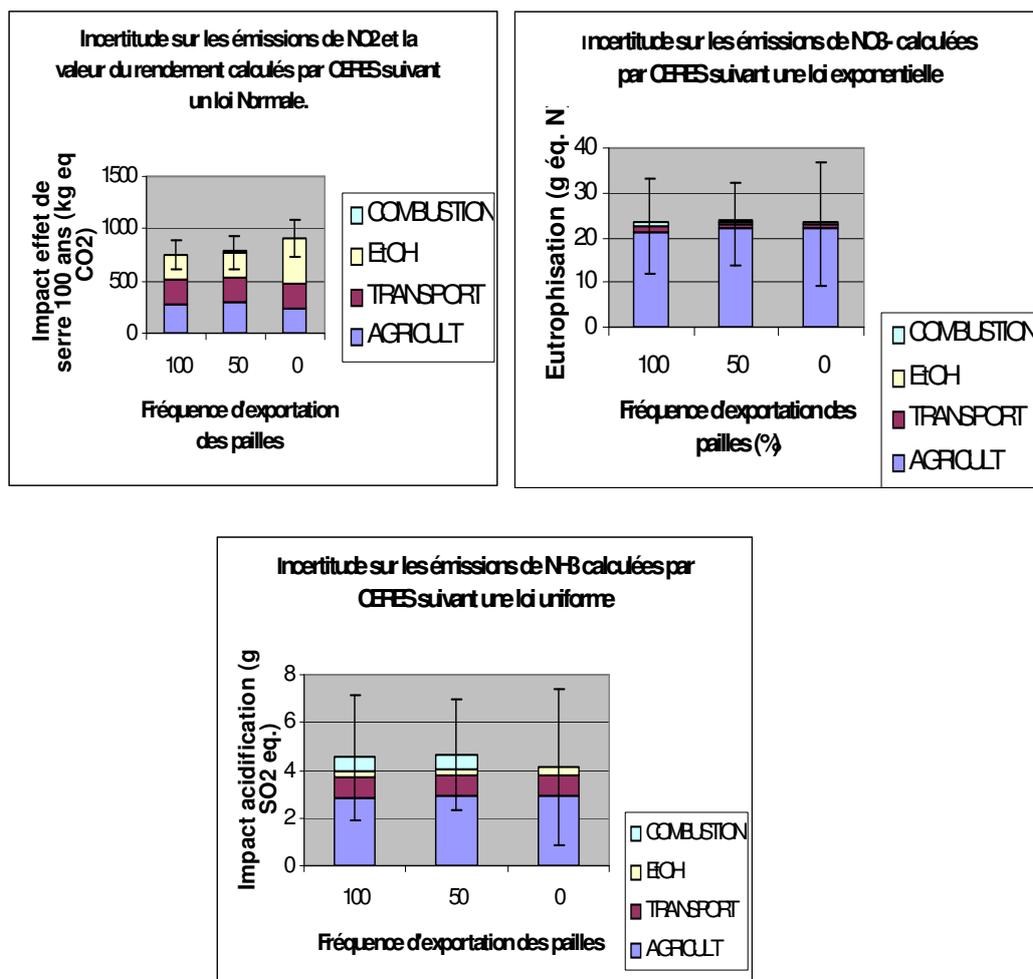


Figure 9. Effet de la fréquence d'exportation des pailles sur les impacts des systèmes S1, S2.1 (50% d'exportation), et S2.2, en ce qui concerne l'effet de serre, l'acidification et l'eutrophisation. Les émissions sont ventilées entre les différentes phases du cycle de vie de l'éthanol, pour le cas de la Marne. Légende des phases : AGRICULT=production agricole ; TRANSPORT=transport champ-usine des pailles et des grains ; EtOH=conversion en éthanol des grains dans l'usine ; COMBUSTION=combustion des pailles et élimination des cendres

□

6. Conclusion

Les deux parties de l'étude rapportée dans ce document montrent :

1. Un effet relativement faible de l'exportation des pailles sur les sorties environnementales et agronomiques des systèmes étudiés. Les effets les plus marquants sont :
 - a. la diminution du rendement du blé avec l'augmentation de la fréquence de prélèvement, avec pertes de l'ordre de 0,5 à 1,5 quintaux de MS/tonne de pailles exportée.
 - b. la part importante du stockage du carbone des pailles restituées (0,05 à 0,1 tonne C / tonne de pailles) dans le bilan effet de serre de la phase agricole
 - c. les effets légèrement positifs ou nuls de l'exportation des pailles sur les pertes de nitrate, les émissions d'ammoniac et d'oxyde nitreux
2. Un bilan très positif de l'utilisation énergétique des pailles dans la production d'éthanol dans l'analyse de cycle de vie du bio-éthanol d'amidon de blé, du point de vue de l'utilisation de ressources non-renouvelables et de l'effet de serre. Les autres impacts étudiés (eutrophisation, acidification, pollution photochimique) sont très peu affectés.

Il faut noter que seul un nombre limité d'impacts (et composés facteurs d'impact) a été étudié. Les impacts des systèmes sur la santé humaine et les écosystèmes (éco-toxicologie) n'ont pas été inclus, faute d'une méthode fiable dans le cadre ACV [Reinhardt, 2000 #33]. Néanmoins il est probable qu'ils auraient conduit à des différences entre les systèmes, avec des émissions plus fortes pour les systèmes avec prélèvement de pailles (émissions de HAP à la combustion, apport de métaux dans les engrais minéraux compensant la valeur fertilisante des pailles). D'autre part il est très difficile de prendre en compte l'effet bénéfique des retours de matière organique sur la qualité du sol (stabilité structurale, fertilité, aération, etc...) dans l'ACV. Des études sont en cours sur les amendements exogènes (composts, déjections animales, ..) pour progresser sur ce volet qui n'est pas mûr à l'heure actuelle.

Enfin sur la partie agricole nous n'avons testé qu'un nombre limité de sols et de climats, et n'avons pas pu confronter les sorties simulées avec des données de terrain. Nous avons fait l'hypothèse que les tests réalisés sur les différentes composantes de CERES (Gabrielle, 1996, 2002, et 2004) sur des sols et climats similaires permettraient de garantir une certaine fiabilité aux simulations, au moins lorsqu'on compare des systèmes de cultures en différentiel. Cela n'en rend pas moins nécessaire des tests centrés plus spécifiquement sur l'effet de la gestion des pailles sur les sorties agronomiques et environnementales de ces systèmes, qui fait l'objet d'un programme de recherche sur le Centre INRA de Lille (programme Valorpailles/Cartopailles).

Partie3 : Analyse économique de l'offre de paille et de quelques valorisations énergétiques

1. Gisement français en paille de céréales

Les pailles de céréales constituent les principaux résidus secs des cultures ; on peut mentionner également les résidus d'oléagineux (colza, tournesol) et du maïs².

1.1. Evaluation du gisement en 1973 (Marsal, Sourie)

La dernière évaluation du gisement en paille disponible est déjà ancienne. Elle a été réalisée par Marsal, Sourie, Gorse (1), en 1976 sur la base de statistiques de production de paille concernant l'année 1973 ; elle a donné les résultats suivants :

Tableau 12 Paille exportable sans danger agronomique

	Millions de tonnes matières brutes
Paille produite	25,8
Paille récoltée	18,3
dont commercialisée	2,3
dont autoconsommée	16
Paille non récoltée	7,5
Paille exportable	4,1
Taux exportable en %	54,7

La paille produite est obtenue en multipliant les surfaces en paille de blé et d'orge par un rendement moyen estimé à 3,8 tonnes de matières brutes par hectare³.

La paille récoltée (71% de la paille produite) est connue grâce à des enquêtes réalisées par le SCEES. La différence entre la paille récoltée et la paille commercialisée constitue la paille autoconsommée (62%), utilisée surtout par les éleveurs ; cette paille retourne ensuite dans les sols, le plus souvent sous la forme de fumiers.

La paille non récoltée est enfouie dans les sols ; en 1972, entre 20 et 50% des pailles non récoltées étaient brûlées alors qu'aujourd'hui le brûlage des pailles est devenu marginal.

Compte tenu des besoins en matières organiques des sols, il n'est pas possible de prélever toute la ressource en paille enfouie. Marsal et Sourie ont estimé que 54,7% de la paille non

² Aux Etats-Unis, ce sont d'abord les résidus de maïs (corn stover) qui sont retenus pour la production d'éthanol par hydrolyse enzymatique

³ Les rendements en paille varient en fonction de nombreux paramètres : espèces, variétés, densité de peuplement, hauteur de coupe, conditions pédo-climatiques

récoltée pouvait être exportée sans danger agronomique soit 4,1 Millions de tonnes à condition toutefois que tous les autres résidus des cultures (Colza, maïs) soient enfouis. A l'époque, pour réaliser cette estimation, le modèle d'évolution des taux de matières organiques de Hénin Dupuis a été utilisé⁴. L'estimation du gisement disponible est une opération délicate car les prélèvements dépendent étroitement des conditions agronomiques locales (sols, climat, assolements, façons culturales). Par ailleurs, les effets des matières organiques sur les sols sont complexes⁵. C'est pourquoi, le taux souhaitable de matières organiques dans les sols fait toujours l'objet de débats parfois passionnés.

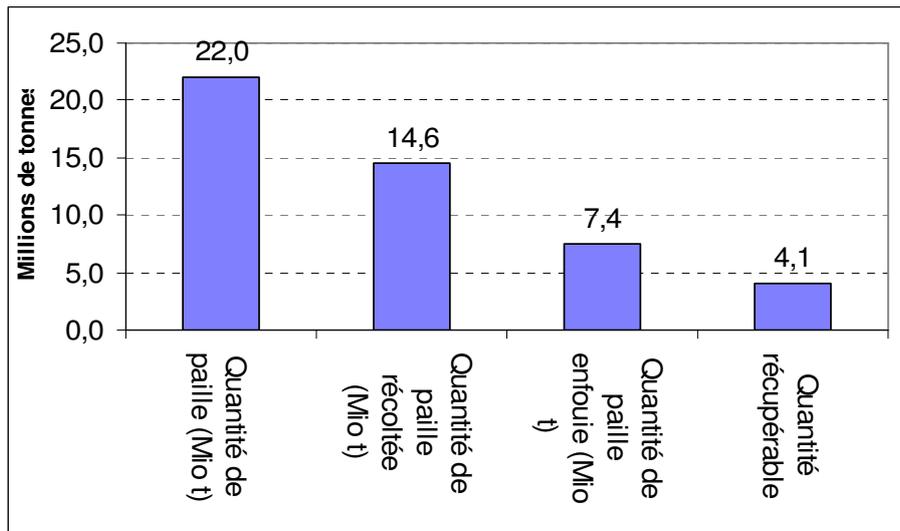
1.2. Nouvelle évaluation du gisement

Cette évaluation plus succincte a été faite, pour l'année 1999, dernière année pour laquelle des données statistiques sur les pailles sont disponibles (Annexe 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Par ailleurs, elle ne concerne que les pailles de blé et d'orges, de loin les plus abondantes. Sur la base d'un rendement de 3,5 t de matières brutes/ha et d'un taux d'exportation de 54,7% (Tableau 12), la quantité de paille de blé et d'orge disponible pour de nouveaux usages s'élève à 4,1 millions de tonnes de matières brutes (soit 3,5 millions de tonnes de matière sèche). Cette paille disponible est surtout concentrée dans le Grand Bassin Parisien. D'une manière totalement fortuite, on retrouve le résultat de Marsal, Sourie, Gorse (1973) car la baisse des rendements en paille (3,5 tonnes au lieu de 3,8) est compensée par un accroissement des surfaces en blé et en orges.

⁴ il existe aujourd'hui des modèles beaucoup plus élaborés (- Mary et Guérif : modèle bi- compartimentaux - Arrouays : modèle Morgane). La paille exportable doit être évaluée au niveau de chaque exploitation en fonction des types de sols, du taux de matière organique et des rotations.

⁵ Un des rôles importants des matières organiques est le maintien ou l'amélioration de la structure des sols ; une bonne structure des sols facilite les interventions culturales et la préparation des lits de semences. Elle prévient la battance des sols limoneux (croûte superficielle qui peut être préjudiciable à une bonne levée des semis, notamment de petites graines)

Graphique 1 Quantités de paille de blé et d'orge, 1999, rendement 3,5 tonnes (M brutes/ha)



Le gisement en paille dépend beaucoup de la hauteur de coupe (Tableau 13). En l'absence de débouchés, la hauteur de coupe de la paille est importante pour faciliter le battage des grains. Cette hauteur de coupe pourrait diminuer si un débouché énergétique se développait ; les rendements pourraient alors passer de 3,5 à 4 tonnes/ha.

Tableau 13 Disponibilité en paille de blé et d'orges en fonction du rendement en paille

	Rendement 3,5 t/ha	Rendement 3,8 t/ha	Rendement 4 t/ha
Millions de tonnes	4,1	5,1	5,8

Ces résultats constituent des ordres de grandeur. Des travaux en cours réalisés par l'INRA de Laon et par ARVALIS vont améliorer la précision de ces estimations.

1.3. Paille et pénurie fourragère

En situation de sécheresse, la paille des régions céréalières constitue un fourrage de dépannage pour les élevages. Un volant de paille de 500 000 tonnes serait nécessaire d'après les dernières statistiques connues. On peut admettre que ce prélèvement peut faire l'objet d'une exportation supplémentaire de pailles enfouies sans préjudice pour la fertilité des sols étant donné son caractère exceptionnel.

1.4. Importance du gisement énergétique contenu dans la paille

Le Tableau 14 donne une idée de l'énergie primaire disponible dans le gisement en paille exprimée en différentes unités : en Tep primaire (1 t de paille = 16200 MJ ou 0,386 Tep), en surface en blé sur la base d'une production équivalente d'éthanol (rendement du blé 8t - 3,5hl

d'éthanol/t de blé - 2,20 hl d'éthanol/t de paille) et en équivalent charbon (1t de charbon vapeur = 0,62 Tep).

Tableau 14 Importance énergétique du gisement en paille

Rendement paille	3,5 t/ha	3,8 t/ha	4,0t/ha
Tonnes de paille	4,1	5,1	5,8
Mtep primaire	1,58	1,97	2,24
Equivalents hectares blé éthanol (10 ⁵ ha)	3,35	4,16	4,73
Equivalent 10 ⁵ tonnes de charbon vapeur	2,55	3,17	3,61

Pour atteindre un objectif d'incorporation d'éthanol dans les essences de 5,75%, 380 000 hectares de blé seraient nécessaires en 2008 (sans éthanol de betterave). Sur un plan purement technique, la ressource en paille, à elle seule, serait en mesure de satisfaire ce besoin.

1.5. Le gisement en paille dans six départements céréaliers du Grand bassin Parisien

ARVALIS a estimé le gisement en paille dans les départements suivants : Somme, Oise, Seine et Marne, Marne, Aisne, Ardennes. Ce sont des départements céréaliers où, en moyenne, la part de paille autoconsommée est faible par rapport à la moyenne nationale (21%), d'où l'importance du stock de paille enfouie. D'après les experts régionaux d'ARVALIS, le taux d'exportation moyen est de 38,5%, taux variable selon les régions (Tableau 15). Ce taux est assez nettement inférieur à celui proposé par Marsal, Sourie, Gorse (1)

Tableau 15 Le gisement en paille (Milliers tonnes) dans six départements céréaliers (source ARVALIS)

Production totale	3954
Production non récoltée	3121
production disponible	1201
disponible/non récoltée	38,5

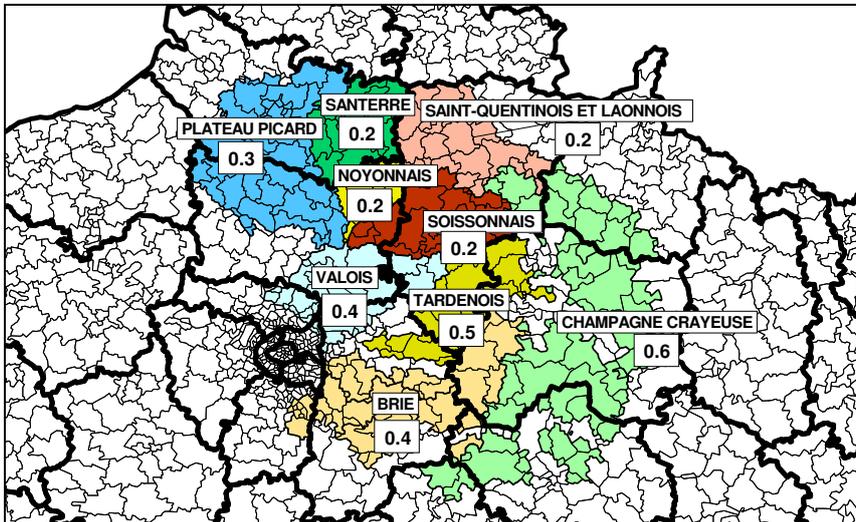
Tableau 16 Le gisement par département en Milliers de tonnes (Source ARVALIS)

	Paille non récoltée	disponible	disponible en %
Somme	591	163	27,6
Oise	567	192	33,9
Seine et Marne	546	214	39,2
Aisne	633	182	28,8
Marne	625	355	56,8
Ardennes	159	95	59,7

La part exportable varie du simple au double selon les départements. Le département de la

Marne a la plus forte ressource potentielle. La disponibilité de la paille dans le département des Ardennes est assez faible en raison de l'importance de l'élevage. La paille disponible est aussi connue par canton, grâce aux déclarations PAC des agriculteurs auxquelles on applique un taux d'exportation régional (Figure 10).

Figure 10 Taux d'exportation des pailles (Source ARVALIS)



1.6. Situation au Danemark

Il est intéressant de donner la répartition des utilisations des pailles dans ce pays pionnier en matière d'utilisations énergétiques des pailles. La dernière connue est celle de 1996 (4). 14% de la paille produite (0,9 million de tonnes) est valorisée sous la forme d'énergie (

Figure 11). Autre élément notable, la production d'aliment du bétail est très importante 30%. Le gisement résiduel est estimé à 2,1 millions de tonnes. La part de paille exportable sans danger agronomique serait donc très importante (90%). La forte volonté politique de valoriser les pailles au Danemark s'exprime au travers de ces chiffres. Il est vrai que le contexte était favorable étant donné l'importance des réseaux de chaleur pour le chauffage des particuliers. Près de 900 installations de chauffage alimentent ces réseaux et plus de 70% d'entre elles produisent aussi de l'électricité par co-génération (5).

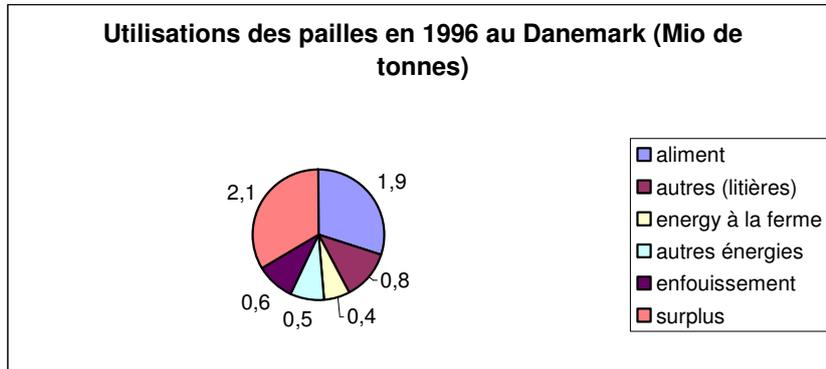
A titre d'illustration, le chauffage urbain du district de Sydlangeland consomme 8000 tonnes de pailles, produit environ 30000 MWh de chaleur pour 760 utilisateurs. La puissance installée en paille est 11,3MW. Le prix de la paille offert aux agriculteurs varie entre 40 €/t à la récolte et 50 €/t au cours de l'année. Probablement, la paille acheminée sur le lieu

Mis en forme : Normal

Supprimé : ¶
Figure 11

d'utilisation doit coûter entre 50 et 60 €/t.

Figure 11 Utilisations des pailles en 1996 au Danemark (Millions de tonnes)



2. Les coûts de collecte

2.1. Méthode

Une approche très analytique des coûts a été mise en œuvre afin de pouvoir calculer les coûts de la paille en fonction des quantités collectées et des distances de collecte. La production de biocarburants peut demander des collectes très importantes de paille, inédites à ce jour : par exemple 500000 tonnes de paille/an pour une production de 3000 hl d'éthanol/j. On peut difficilement extrapoler à ces situations les coûts de transport actuels qui correspondent à des transports sur de longue distance de petites quantités de paille, destinées à des éleveurs ou à de petites industries.

2.2. Données de base

Les données de base ont été élaborées par la FNCUMA et ARVALIS, deux organismes ayant une grande expérience dans le domaine de la collecte des pailles. De nombreuses chaînes de collecte ont été étudiées (7). Pour minimiser les coûts de collecte eu égard aux techniques disponibles, une chaîne de collecte fondée sur des balles parallélépipédiques de 400 kg a été retenue avec un seul stockage intermédiaire (stocks sous bâches⁶ de 500 à 600 tonnes de paille regroupant la production de 5 à 6 exploitants agricoles). La paille est transportée par camion de 20 tonnes depuis ces stockages intermédiaires jusqu'au stock final implanté sur le lieu

⁶ La reprise des balles stockées et la mise en tas étant des opérations coûteuses, l'approvisionnement des usines est fait à partir de stocks intermédiaires de petite taille à proximité des exploitations. Les exploitants agricoles peuvent ainsi participer à la collecte et permettre une rationalisation de l'emploi de la main d'œuvre à la récolte et au ramassage.

d'utilisation.

Les coûts ont été élaborés par opération technique. La chaîne des opérations est la suivante : andainage, pressage, ramassage, transport, déchargement, stockage intermédiaire sous bâche, chargement des camions, transport, déchargement et enfin stockage sur le lieu d'utilisation.

Les données de base détaillées figurent dans l'Annexe 5 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Elles ont été organisées dans des tableaux EXCEL qui automatisent les calculs des coûts. Il est possible de modifier chaque donnée de base ainsi que les distances de transport.

2.3. Définitions des coûts:

Coût de collecte élémentaire

Le coût élémentaire est le coût obtenu pour une distance de transport donnée entre un point de stockage et un point d'utilisation. Le coût de la paille en andains est donné par la valeur des éléments fertilisants exportés. Chaque opération technique est évaluée « au coût des facteurs », sans profit. Les capitaux supportent uniquement des frais financiers, soit 5%. Pour inciter les acteurs à investir et les producteurs agricoles à offrir leur paille des profits devront être introduits. On passera alors du coût élémentaire au « prix théorique ».

Le coût élémentaire de collecte de la paille est la somme des coûts suivants (corrigés par les taux de perte en paille tout au long de la chaîne):

Coût de la paille en andains (valeur des éléments fertilisants)

Coûts des opérations techniques élémentaires cités précédemment.

Frais généraux

Chaque opération technique nécessitant des investissements fait l'objet d'un calcul actualisé afin de tenir compte des amortissements et des frais financiers (taux choisi 5%). La formule classique utilisée est la suivante :

Soit q la quantité annuelle de paille récoltable avec l'investissement I

I l'investissement en matériel

V la valeur résiduelle

n la durée d'amortissement

a frais financiers ou taux de rentabilité des capitaux

d les dépenses d'entretien, de carburants et les consommations diverses par tonne de paille

s les dépenses de main d'œuvre eu égard au nombre de personnes nécessaires pour réaliser l'opération et au temps passé par tonne de paille.

Coût actualisé d'une opération technique par tonne de paille :

$$C = A + d + s$$

Avec A amortissement économique par tonne de paille⁷ soit

$$A = [aK / (1 - (1+a)^{-n})] / q$$

$K = I - V / (1+a)^n$, K étant l'investissement moins la valeur résiduelle V actualisée

Coût de la paille en andains

Tableau 17 Coût de la paille en andains

	Exportations		
	en Kg	prix des unités en €	€/t
N	4	0,58	2,3
P205	2	0,84	1,7
K2O	12	0,43	5,1
total			9,1

La valeur des éléments fertilisants exportés est estimée à 9,1 euros/t. On verra ultérieurement que le prix de la paille en andains devra être nettement supérieur à ce coût pour inciter les agriculteurs à offrir leur paille.

Quelques coûts d'utilisation des matériels de récolte

Tableau 18 Coûts des matériels

	Investissement	durée		Coût horaire actualisé
		d'amortissement	Heures/an	
Tracteur 120	50000	7	600	19,9
Tracteur 180	66320	7	600	27,7
Chargeurs télescopiques	43100	7	760	23,0

⁷ L'amortissement économique est la somme de l'amortissement comptable et de la rémunération des capitaux.

	Investissement	durée d'amortissement	Heures/an	Paille/t an	Coût tonne actualisé
Andaineur	30800	7	235,3	10500	1,3
Presse	76225	7	195,3	5250	5,1
Remorque	12200	12	760	6080	0,2

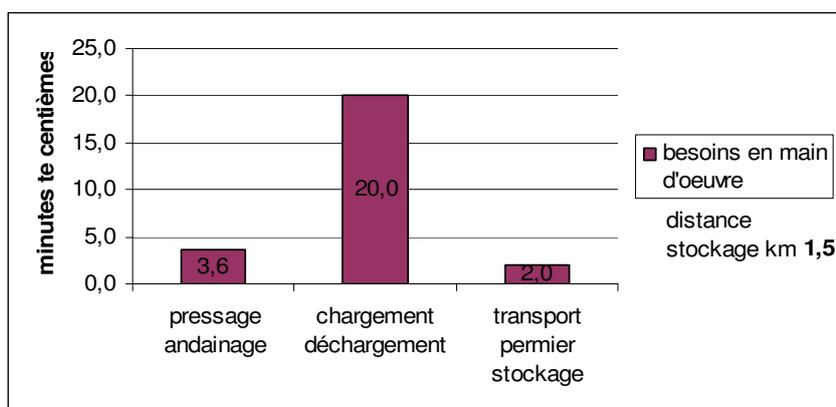
* distance champ stockage intermédiaire 1,5km

	Investissement	durée amortissement	Heures/an	Coûts fixes journaliers		Prix gazole €/l	Coût variable km
				camion	chauffeur		
camion 20t	140000	8	2000	146	153	1	0,30

Les frais financiers sont égaux à 5% ; la récolte a lieu durant 20 à 30 jours.

Besoins en main d'œuvre par tonne jusqu'au premier stockage

Graphique 2 besoins en main d'oeuvre



Les besoins en main d'œuvre sont surtout importants pour réaliser le ramassage puis le stockage.

2.4. Un exemple de coût élémentaire

Le cadre d'hypothèses est le suivant :

Récolte durant une période de 20 à 30 jours

Balles parallélépipédiques de 400kg

Ramassage avec une remorque de 12 tonnes

Chargement avec chargeur télescopique

Stockage intermédiaire sous bâche, distance moyenne 1,5km

Transport en camion de 20 tonnes sur une distance de 50 Km

Coût du stockage final pris en compte

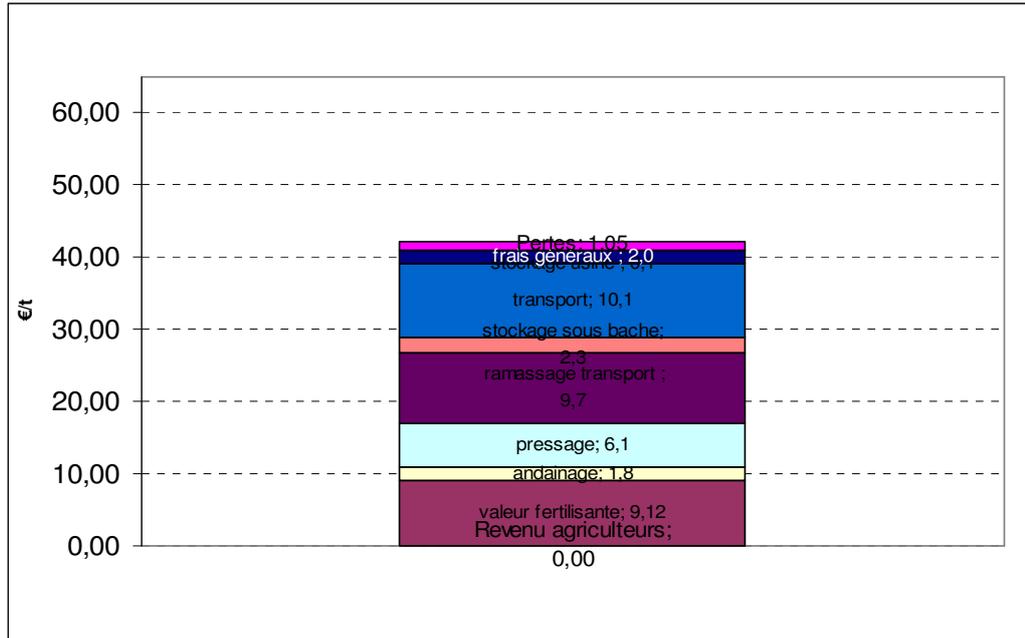
Rémunération des capitaux 5%.

Valeur de la paille en andains = coût des éléments fertilisants

Tableau 19 Autres hypothèses

Rémunération des capitaux	%	5%
Coût main d'œuvre agricole	€/h	10,7
Fuel agricole	€/l	0,5
Gazole	€/l	1
Frais généraux récolte	%	5%
Frais généraux transport	%	5%
Perte récolte	%	3%
Perte transport	%	3%

Graphique 3 Coût élémentaire de collecte, distance de transport 50 km



Le coût élémentaire (frais financiers 5%) est de 42,1 €/tonne pour une distance de transport de 50 km.

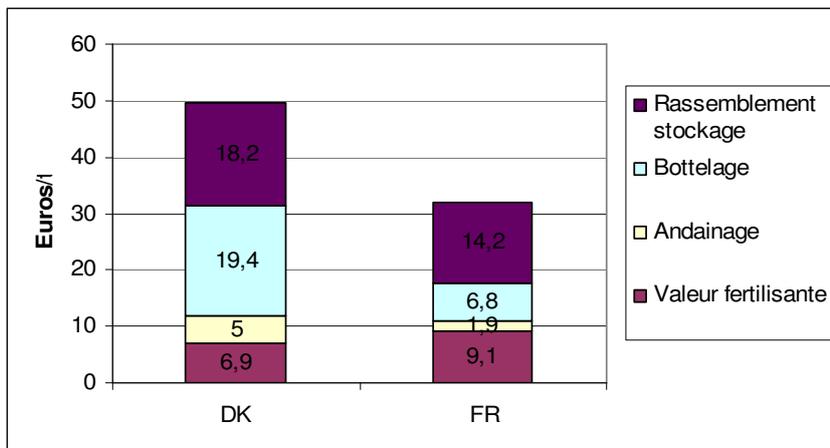
On constate que les coûts de transport stricto sensu ne constituent pas la part essentielle des coûts, seulement 23%. Ce sont les coûts agricoles : valeur fertilisante, coûts du pressage, du ramassage et du stockage qui forment près de 66 % du coût de collecte (pour une distance moyenne de collecte de 50 Km).

2.5. Coût de récolte la paille au Danemark

En 1997, le département des constructions agricoles et du machinisme a évalué le coût de récolte de la paille au Danemark à 49,5 euros par tonne, valeur très supérieure au coût français

qui s'explique principalement par un écart de coût important au niveau du pressage.

Graphique 4 Coûts comparés de la récolte de paille au Danemark et en France



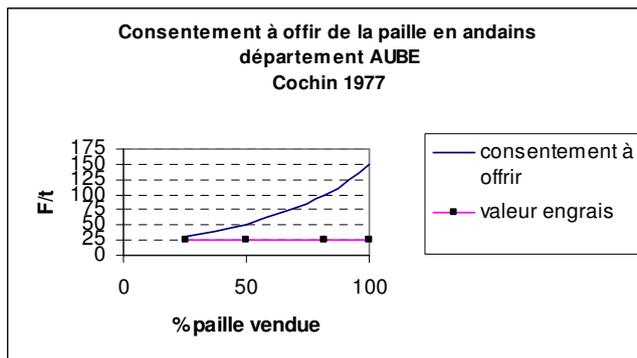
1DKK = 0,134561 €

2.6. Prix théorique

Agriculteurs et offre de paille

Les agriculteurs ne vont pas accepter que le prix de la paille en andains soit tout juste égal à la valeur des éléments fertilisants. Ces derniers veulent d'une part que la collecte de paille soit une source de revenu agricole supplémentaire pour leur exploitation et d'autre part, ils veulent aussi que soient rémunérés les risques encourus (exportation de matières organiques, décalages possibles des semis d'automne préjudiciables aux rendements,..) Dans les années 80, un consentement à offrir de la paille en andains avait été estimé par enquête auprès des exploitants (Graphique 5).

Graphique 5 Consentement à offrir des producteurs de paille



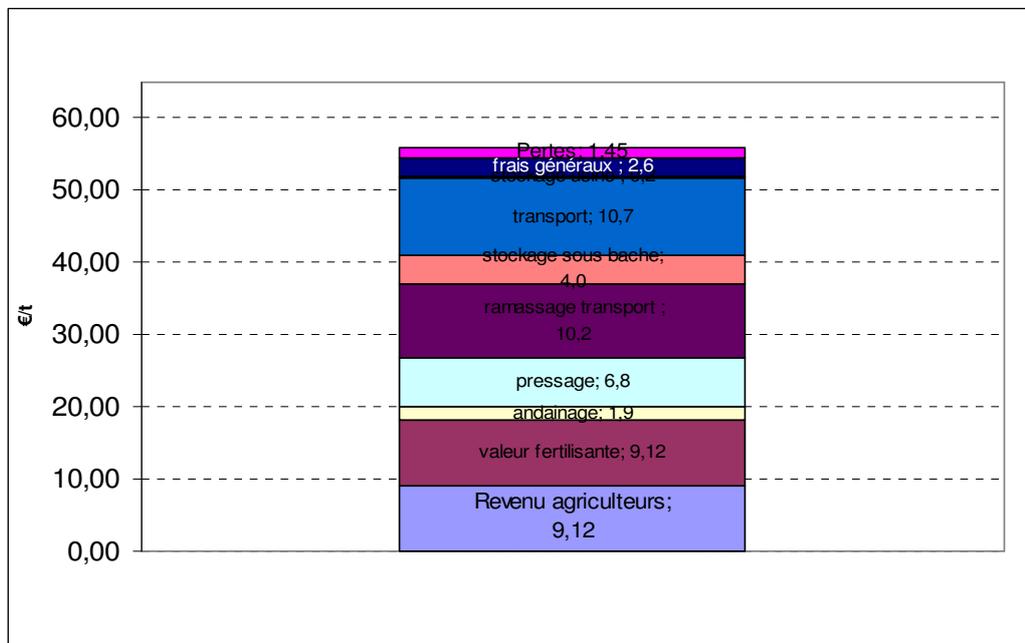
Il en ressortait que le prix devait être égal au double de la valeur fertilisante pour que 50% des

agriculteurs soient vendeurs de paille, puis quatre fois supérieur pour inciter 80% des producteurs à offrir leur paille. Faute d'enquêtes plus récentes, ces résultats, bien qu'anciens, vont être extrapolés à la situation actuelle pour calculer un prix théorique.

Prix théorique de la paille

Le prix théorique (Graphique 6) est obtenu en rémunérant les capitaux à 10% (donc 5% de rentabilité nette) et en fixant un prix de la paille en andains à 18 euros de façon à avoir un revenu agricole de 9 euros par tonne de paille vendue. A ce prix, 50% des producteurs devraient accepter de vendre leur paille. Dans ces conditions, le prix théorique de la paille transportée à 50 km est de 56 euros/t ; il génère 14 euros de profit par tonne pour la filière, dont 9 pour les producteurs agricoles. Pour collecter toute la paille d'une zone géographique donnée, le prix de la paille en andains doit encore s'accroître, ce qui aboutit finalement à un prix théorique de la paille de 66-70 euros/t.

Graphique 6 Prix théorique de la paille, distance de collecte de 50 km

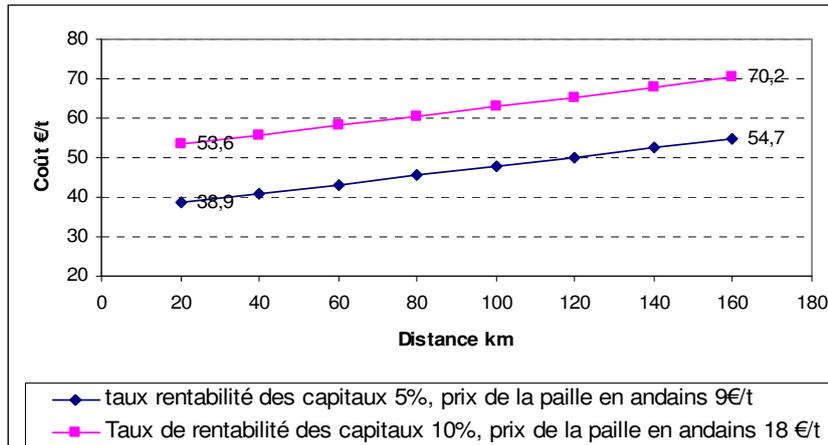


Effets de quelques paramètres

L'allongement des distances accroît les coûts de transport et totaux de façon linéaire (Annexe 7 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) à condition que la distance maximale de transport ne dépasse pas 150-170 km (au-delà de cette distance, une rotation ne pourrait plus s'effectuer dans le cadre de la journée de travail, d'où des frais supplémentaires). Le Graphique 7 montre l'évolution des coûts et des prix théoriques si la distance de collecte varie entre 5 et 150 km.

Ce graphique peut être utilisé pour estimer les coûts de la paille pour une unité de transformation en prenant comme distance, la distance moyenne de collecte si celle-ci est connue à priori. Dans le cas simple où la densité de paille par hectare de territoire est à peu près constante et où l'aire de collecte peut être assimilée à un cercle de rayon R (R distance maximale de collecte), la distance moyenne de collecte est égale au 2/3 du rayon maximal de collecte (Annexe 6 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Graphique 7 Coûts en fonction des distances et des revenus attribués aux acteurs de la filière



Une hausse de 20% des carburants accroît le coût de la paille de 0,5 €/t environ pour de petites distances de collecte et de 1,0 à 1,3 euros/t pour de longues distances, supérieures à 100 km.

10% de hausse du coût de la main d'oeuvre entraîne une hausse de 1,6 €/t, quelles que soient les distances de collecte.

Exemple d'un impact de la vente de paille sur le revenu agricole

Tableau 20 Incidence de la vente de paille sur le revenu agricole d'une exploitation céréalière

Surface exploitations céréalières	ha	130	
Surfaces en céréales	ha	84,5	
Rendement en paille	t/ha	3,5	4
Gisement	tonnes	124,215	141,96
prix paille en andains	€/t	18,24	18,24
Valeur des éléments fertilisants	€/t	9,12	9,12
Revenu par tonne	€/t	9,12	9,12
Revenu par exploitation	€	1133	1295
Revenu par hectare	€/ha	8,7	10,0

Dans ce cas de figure la collecte des pailles augmente le revenu agricole entre 8,7 et 10 € par hectare, soit +4 à 5% de hausse de revenu. Pour les agriculteurs, il y a tout lieu de penser que cette hausse est significative.

3. Optimisation de la collecte de paille à l'échelle régionale

3.1. Définition

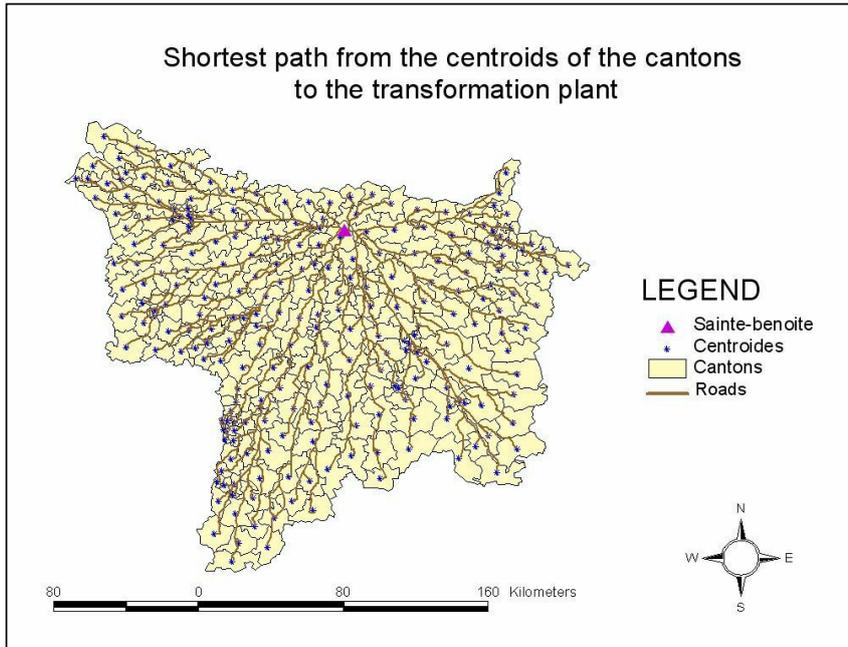
L'approvisionnement d'une unité va se faire à partir d'une zone de collecte plus ou moins importante sur laquelle sont disséminés les points de stockage. Le coût élémentaire (ou le prix théorique) va varier en fonction de la distance entre le point de stockage élémentaire et le point d'utilisation. Le coût total de la collecte va être égal à la somme des coûts élémentaires, pour l'ensemble i des points de stockage concernés, soit $\sum c_i q_i$ et le coût moyen par tonne de paille, celui qui nous intéresse, s'écrit : $\sum c_i q_i / \sum q_i$.

3.2. Exemple de coûts de collecte en Nord Picardie et Champagne-Ardenne

Une étude concrète du coût de la paille a été réalisée pour un projet de valorisation de la paille situé dans le canton de Ribemont (Aisne). La paille collectée devait servir de combustible en remplacement du gaz naturel utilisé dans une unité de production d'éthanol.

Le gisement en paille est connu par canton et la distance la plus courte de chaque canton au canton de Ribemont a été calculée (Utilisation du logiciel ARCGIS, paille supposée stockée aux centroïdes de chaque canton, prise en compte du réseau routier). A partir du vecteur des distances, le calcul des coûts qui porte sur les 242 cantons constituant le six départements cités précédemment a été réalisé. Ce calcul a été automatisé (programme informatique écrit en VBA) à partir des fiches excel de calcul des coûts élémentaires de collecte (Annexe 5 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Graphique 8 Réseau routier convergent vers le canton de Ribemont

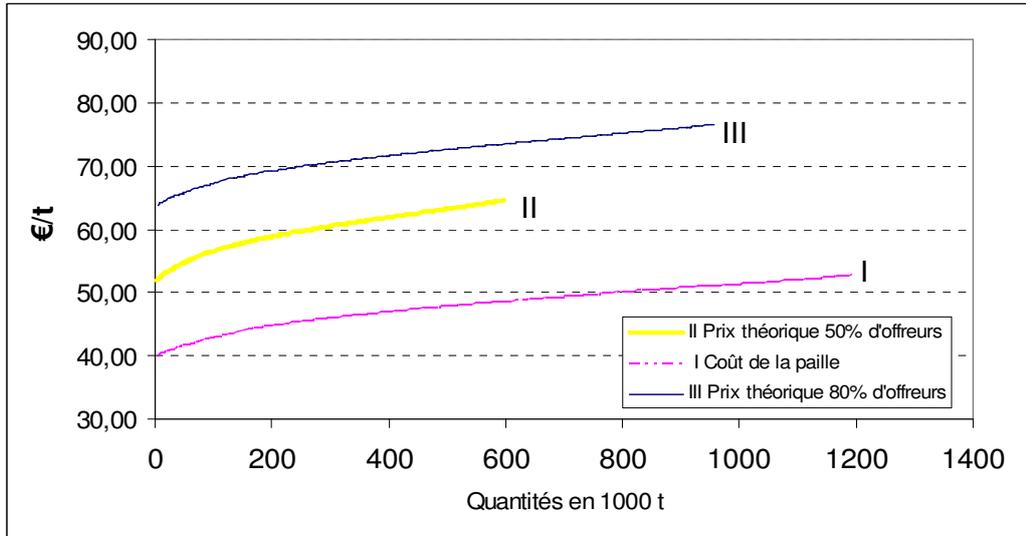


Le point de collecte de la paille est assez excentré (nord de l'Aisne) par rapport à la zone potentielle de collecte. On voit sur cette carte la position du Chef lieu de canton de Ribemont ainsi que l'ensemble du réseau routier y aboutissant selon le chemin le plus court. Les cantons devant constituer l'aire d'approvisionnement sont choisis de manière à ce que le coût de collecte de la paille soit minimisé.

La courbe I décrit l'évolution du coût de collecte (stricto sensu) des quantités collectées en fonction des distances. Par exemple, une collecte de 600 000 tonnes coûte 48,6 euros/t ; la collecte de toute la paille disponible dans les six départements, soit 1,2 million de tonnes, coûte en moyenne 52,7 euros par tonne. Ces résultats confirment le faible impact de la distance de collecte sur les coûts.

La courbe II (prix théorique) tient compte de gains « normatifs » pour les acteurs (9 €/t de revenu agricole pour les agriculteurs et 10% de taux de rentabilité interne pour les capitaux engagés dans la récolte). Dans ces conditions, compte tenu du comportement à offrir, 600 000 tonnes de paille sont disponibles au prix théorique de 64,7 euros/t. Pour mobiliser la quasi-totalité de paille de la région, l'incitation à offrir est estimée à 20 € de revenu agricole par tonne de paille soit le double de l'incitation précédente ; la courbe III montre alors le prix théorique de la paille en fonction des quantités collectées. La collecte de l'ensemble de la paille disponible dans les six régions pourrait être réalisée pour un prix théorique de 76,6 €/t.

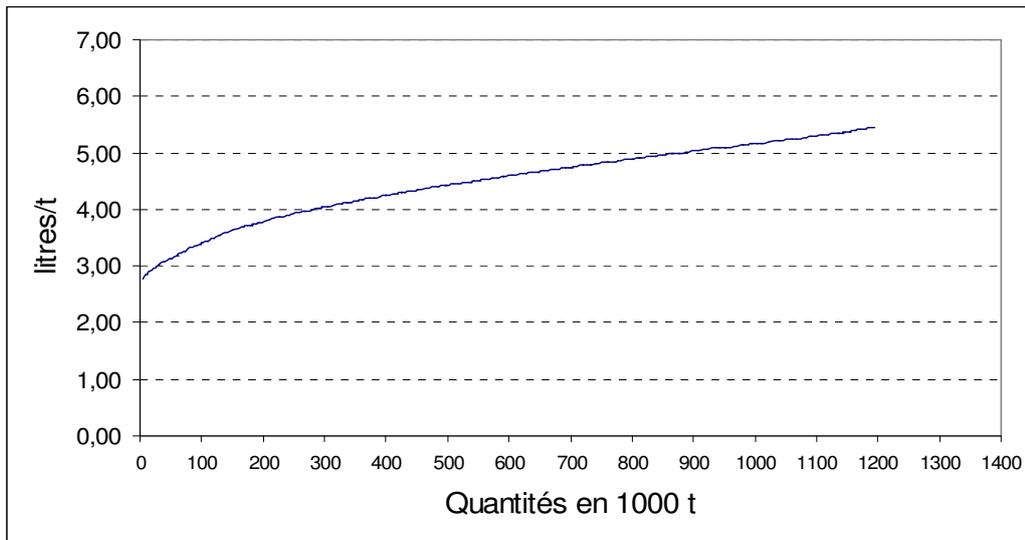
Graphique 9 Coûts de collecte de la paille en fonction des quantités collectées



Plus le prix de la paille en andains est élevé, plus la quantité de paille disponible est abondante. Réciproquement, plus la surface de la zone de collecte diminue pour un besoin donné en paille. On est en présence d'évolutions inverses de deux composantes du prix théorique, le prix de la paille en andains et le coût de transport. Pour minimiser le coût de collecte, il faudra rechercher un compromis entre le prix de la paille en andains et les coûts de transport. Cette question sera traitée plus loin.

Le Graphique 10 donne la consommation moyenne de carburant agricole et routier par tonne de paille en fonction des quantités collectées. La consommation moyenne de carburant varie peu en fonction de ce paramètre et donc de la distance. La récolte consomme à elle seule 50% des carburant. L'allongement des distances de transport affectera peu les bilans gaz à effet de serre.

Graphique 10 *Consommation moyenne de carburant par tonne de paille en fonction des quantités collectées*



4. Minimisation des coûts de collecte et localisation optimale des utilisateurs de la paille

Un outil de minimisation des coûts sous contraintes a été élaboré qui fait appel à la programmation mathématique⁸. Il peut traiter simultanément du cas d'unités de transformation dont la localisation est fixée a priori et d'unités dont la localisation est libre parmi les 242 cantons de la région. Cet outil peut également prendre en compte le comportement à offrir des agriculteurs, le prix de la paille en andains devenant alors une variable endogène à optimiser.

4.1. Première approche, le prix de la paille en andains est exogène et constant.

Pour cet exercice, le prix de la paille en andains est fixé à 30 euros, soit le triple de la valeur fertilisante. On suppose que les agriculteurs sont disposés à offrir 100% de la paille disponible à ce prix. Les coûts de récolte de la paille sont donc constants ; seuls, les coûts de transport vont varier en fonction des distances. La région comprend 242 cantons qui constituent autant de localisations possibles des unités de transformation.

Pour trouver les localisations optimales, on minimise le coût de collecte, les besoins par usine étant fixés. L'optimisation est faite simultanément pour l'ensemble des usines retenues. On

⁸ On utilise le logiciel d'optimisation sous contraintes GAMS, donné en annexe III

pourrait également procéder par optimisations successives, chaque nouvelle usine étant localisée de manière optimale compte tenu de la zone de collecte optimale des usines précédentes. Cette façon de faire augmenterait nécessairement le coût de l'ensemble de la collecte par rapport à une localisation concertée. Par ailleurs le coût d'approvisionnement de chaque usine dépendrait de l'ordre en fonction duquel seraient choisies les différentes usines.

Un exemple

Deux points de collecte sont fixés à priori :

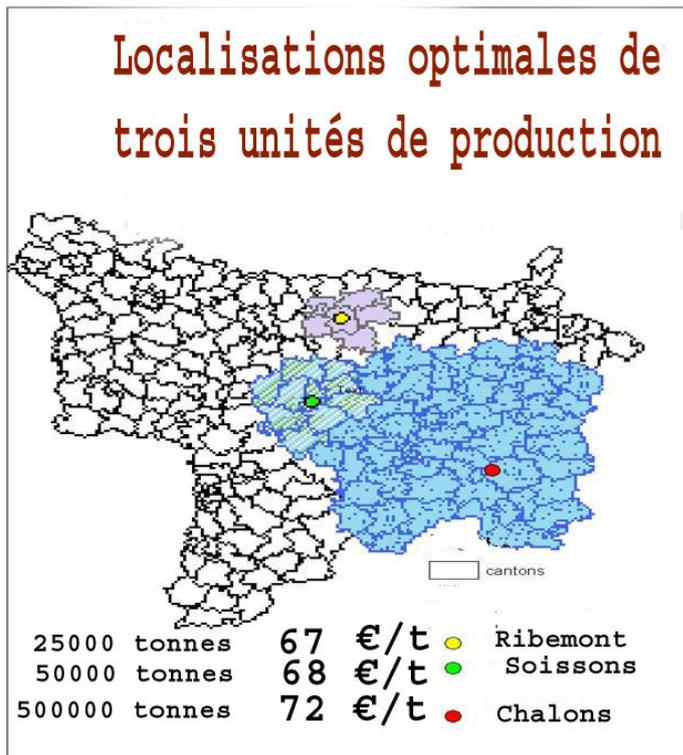
25 000 tonnes de paille dans le canton de Ribemont pour produire par cogénération une petite partie des besoins en énergie thermique et électrique nécessaire à la production d'éthanol

50 000 tonnes dans le canton de Soissons Sud pour une production de pâte à papier.

Un point de collecte peut se situer dans l'un quelconque des 242 cantons :

500 000 tonnes de paille pour la production de 1,1 Millions d'hectolitres d'éthanol par hydrolyse enzymatique (taille des unités envisagées dans les études américaines)

Figure 12 Localisations optimales de trois usines de traitement des pailles



La carte ci-dessus (Figure 12) visualise les aires de collecte optimales. Pour que les coûts totaux de collecte soient minimisés, le modèle propose que la localisation de la troisième unité se fasse en Champagne, près de Chalons, région de forte disponibilité en paille.

Tableau 21 Prix théoriques (en euros/t) et distances de collecte⁹

localisation	capacite	distance moyenne	Prix théoriques	distance maximum	prix marginaux
Ribemont	25000	17	67,35	27	68,6
Soissons	50000	27	68,56	42	70,5
Chalons	500000	65	72,24	112	78,8

4.2. Deuxième approche le prix de la paille en andains est endogène, prise en compte du comportement à offrir.

La disposition à offrir des producteurs est introduite en supposant une relation linéaire entre le prix de la paille en andains et le pourcentage de paille collecté. Les courbes du Graphique 5

⁹ le prix marginal est le prix de la paille, rendue usine pour le canton le plus éloigné du site d'utilisation.

ont été reprises et adaptées en considérant qu'aucun producteur n'acceptait de vendre de la paille à un prix inférieur à 10 euros/t, valeur fertilisante et que 50% des producteurs voulaient bien vendre leur paille à un prix égal au double de la valeur fertilisante. On obtient la relation suivante :

$$\text{Prix de la paille en andains} = 20 \cdot \text{offre} + 10$$

Avec offre en pourcentage compris entre 0 et 1.

Si le prix de la paille en andains est égal à la valeur des éléments fertilisants, l'offre est nulle.

Si le prix de la paille en andains est égal à 30 euros, 100% de la paille est collectée.

Tous les agriculteurs de la région bénéficient du même prix de la paille en andains. Il paraît en effet politiquement difficile de mettre en œuvre une différenciation spatiale du prix de la paille en andains.

Optimisation de l'aire de collecte pour une seule industrie, localisée à Ribemont

Premier entrant sur le marché de la paille, cette entreprise est en présence d'une ressource en paille abondante. L'optimisation de la collecte est obtenue si 13% seulement de la paille est collectée, soit un prix de la paille en andains de 12,5 euros/t. Cette unité a tout intérêt à élargir son aire de collecte afin d'acheter sa paille au prix le plus bas possible. On observe en effet que la distance maximale de collecte est supérieure à la précédente, 66 km (Tableau 22) au lieu de 27 km (Tableau 21).

Tableau 22 Optimisation de la collecte site de Ribemont , prix de la paille en andains variable endogène

localisation	% paille récoltée	Prix paille andains €/t	capacite t	distance moy km	prix théorique de la paille €/t	distance max km	€/t
Ribemont	13%	12,5	25000	42	48	66	61

Le coût moyen de la collecte décroît de 67 euros (Tableau 21) à 48 euros/t. Cette stratégie, peu réaliste, n'anticipe aucun nouvel utilisateur de paille dans la région.

En effet, comme le montre le Tableau 23, l'arrivée d'un nouvel entrant, localisé par hypothèse dans le canton de Soissons et qui va collecter 50000 tonnes de paille, provoque un accroissement du prix de la paille en andains.

Tableau 23 Effet d'un nouvel entrant sur le prix de la paille

localisation	% paille collectée	Prix paille andains €/t	capacite t	distance moyenne km	Prix théorique €/t
Ribemont	16%	13	25000	41	48,7
Soissons-Sud	16%	13	50000	48	49,4

Ce prix passe de 12,5 €/t à 13 €/t tandis que le pourcentage de paille collectée augmente parallèlement de 12,5 à 16%. Cette hausse du prix se répercute sur les achats de paille du premier entrant qui modifie légèrement son aire de collecte en raison de l'entente entre les deux entreprises.

Considérons un dernier entrant, gros consommateur de paille (500 000 tonnes en vue d'une production d'éthanol).

Tableau 24 Effet d'une collecte importante 500000 tonnes sur le prix de la paille

Localisation	% paille collectée	Prix de la paille en andains €/t	Capacité t	distance moyenne (km)	Prix théorique €/t	distance max (km)	Prix marginal €/t
Ribemont	50%	20	25000	26	53,46	60	56,4
Soissons-Sud	50%	20	50000	77	59,41	127	65,6
Chateau-Thierry	50%	20	500000	81	60,04	160	70,3

L'accroissement substantiel de la collecte dans la région (de 75000 tonnes à 575000 tonnes) soit 50% de la paille disponible, induit une hausse significative du prix. Le prix de la paille en andains augmente de 7 euros (nouveau prix de la paille en andains 20 euros/t). Pratiquement, la collecte a lieu dans tous les cantons de la zone étudiée. Le prix théorique de la paille atteint 60 €/t pour l'usine d'éthanol qui va collecter la paille jusqu'à une distance maximum de 160 km.

Une situation conflictuelle entre les utilisateurs serait un facteur de hausse supplémentaire du prix de la paille.

Conséquences sur l'organisation de la collecte des pailles

Cette analyse montre la nécessité d'une régulation de l'offre. Les coopératives d'approvisionnement pourraient mettre en œuvre cette régulation. Un prix suffisamment élevé de la paille en andains doit être proposé dès le premier acheteur, afin que soient correctement anticipés une croissance ultérieure de la demande de paille et du prix de la paille en andains.

5. *Economie de quelques filières énergétiques fondées sur la paille*

Deux cas vont être examinés :

- la paille source d'énergie pour alimenter en chaleur et en électricité une unité de production d'éthanol de blé d'une capacité de 100 000 tonnes d'éthanol
- la paille matière première pour la production d'éthanol par hydrolyse enzymatique (2700 hl/j d'éthanol).

5.1. **La paille source d'énergie pour une unité d'éthanol de blé.**

L'utilisation de la paille comme combustible améliore les bilans énergétiques et les bilans gaz à effet de serre de la production d'éthanol carburant (CF. l'analyse de l'UMR EGC et l'étude réalisée en 2004 par LowC^{vp} 8).

LOWC^{vp} a également étudié l'impact sur le bilan économique de l'éthanol d'une utilisation de la paille. Sept scénarios d'approvisionnement énergétique d'une unité de 100 000 tonnes d'éthanol ont été analysés dont cinq fondés uniquement sur l'utilisation d'énergie fossile (Gaz naturel) et deux sur l'utilisation de paille. Dans un seul scénario, il est fait appel à l'électricité du réseau. Pour tous les autres scénarios, il y a cogénération d'électricité. Deux scénarios seulement vont être retenus et comparés, la cogénération d'électricité par turbine à vapeur soit en utilisant du gaz (scénario 1), soit en utilisant de la paille (scénario 2). La quantité de paille utilisée dans le scénario 2, correspond à la quantité de paille produite par le blé transformé en éthanol soit une disponibilité de 1,42 tonne de paille par tonne d'éthanol. Il se trouve que cette quantité de paille est suffisante pour remplacer totalement le gaz naturel présent dans le scénario 1 et pour générer un excédent d'électricité. Si une telle usine est implantée dans la région étudiée, il faut retenir au minimum un prix moyen de la paille (prix utilisateur) de 57 euros (prix de la paille en andains 20 euros/t).

Le prix de rachat de l'électricité est un paramètre important. Le prix de rachat de l'électricité produite à partir de la biomasse est fixé par l'arrêté du 16 avril 2002. La formule de calcul du prix dépend notamment du taux de disponibilité effective de l'installation et de l'efficacité énergétique (énergie valorisée, thermique ou énergétique, par rapport à l'énergie sortie chaudière). L'étude ADEME(9) indique que le prix de l'achat de l'électricité aux installations de cogénération utilisant la biomasse devrait se situer entre 50 et 61 €/MWh si le taux de disponibilité est compris entre 75 et 85% et si l'efficacité énergétique dépasse 60%. On va retenir un prix moyen de 55€/MWh (Tableau 25) pour l'installation à paille. Ce prix semble peu différent de celui dont bénéficie toute installation de cogénération. L'électricité issue de la biomasse ne bénéficie pas d'un régime de faveur. Par conséquent, l'électricité produite par cogénération en utilisant du gaz naturel (scénario 1) sera valorisée au même prix.

Tableau 25 Hypothèses de Prix

	Unités	GPB	Euros
Blé	t	75	111,7
Paille	t	0,0	57,0
DDGS	t	75	111,7
Gaz naturel	GJ	3,03	4,5
	MWh	10,9	16,2
Electricité	GJ	10,3	15,3
	MWh	36,9	55,0
Gazole	l	0,18	0,27
Taux de change	1 GPB =	1,4898	euros

Tableau 26 Impacts micro-économiques de l'utilisation des pailles comme source d'énergie dans une unité de production de 100 000 tonnes d'éthanol

	scénario 1 gaz naturel et turbine à vapeur	scénario 2 Paille et turbine à vapeur
EtOH produit en tonne	100000	
Besoins en paille en t		142000
	Millions euros	
Charges variables annuelles		
Blé	33,8	33,8
Gaz naturel	6,6	
Electricité réseau		
Paille		8,1
Recettes annuelles		
DDGS (alimentation animale)	-12,8	-12,8
Electricité vendue	-2,2	-3,2
Charges fixes annuelles		
Investissement	64,1	104,3
Amortissement et frais financiers	9,7	15,6
Frais de fonctionnement (MO, Frais généraux, divers)	2,5	4,2
Cout annuel de production de 100000t /etOH	37,5	45,7
Production éthanol en millions hl	1,3	1,3
Cout de production euros/hl	29,3	35,7

Source LOWC^{VP} Octobre 2004

L'utilisation des pailles à la place du gaz entraîne un investissement supplémentaire de 40 millions d'euros¹⁰, ce qui accroît l'amortissement économique de 6 millions d'euros, (amortissement 10 ans, taux de rémunération des capitaux 8%). Le surcoût de l'achat de paille par rapport au gaz (+1,5 millions d'euros) n'est pas compensé par le surplus d'électricité

¹⁰ Le montant de l'investissement retenu est du même ordre de grandeur que celui donné par l'ADEME en 2002 qui prévoyait un investissement de 36 Millions d'euros pour une centrale à cogénération utilisant 200 000 tonnes de bois (9).

vendu (+1 millions d'euros). Finalement, l'utilisation des pailles augmente le coût de l'éthanol de 6,4 euros par hectolitre.

L'utilisation des pailles induit des avantages qui n'apparaissent pas dans le bilan micro-économique : la création d'emplois induite par la collecte des pailles et l'externalité positive « gaz à effet de serre ».

Dans une première approche, on peut estimer l'avantage résultant des créations d'emplois en donnant un coût public nul au travail dans le calcul des coûts de collecte pour tenir compte du chômage. Le coût de la paille diminue alors de 11,5 euros par tonne¹¹.

La réduction des émissions de gaz à effet de serre est estimée à 0,387 tonne d'équivalent CO₂ par tonne de paille par l'étude LOWC^{VP} et à 0,770 tonnes par l'étude INRA EGC.

D'après Benoit Gabrielle (UMR Environnement Grande culture), deux raisons principales expliquent l'écart d'émissions entre les deux études : a) une valeur fertilisante de la paille beaucoup trop importante, les teneurs en NPK des pailles retenus par LOWC^{VP} sont 3 à 8 fois supérieures à celles prises par l'INRA, basées pourtant sur une analyse en éléments totaux.
b) les pailles sont affectées d'une émission de N₂O au champ également très importante (correspondant à 0,17 t CO₂eq/t pailles) pour des raisons difficilement analysables.

Ces réductions des émissions de gaz à effet de serre peuvent être monétarisées sur la base d'un prix du quota CO₂ de 25 euros/t (valeur mars 2006)

¹¹ Calcul fait à partir du fichier excel de calcul des coûts de la paille

Tableau 27 Prise en compte des créations d'emploi pour la collecte de paille et de la réduction des émissions gaz à effets de serre

		Source d'énergie		Calcul des avantages paille	
		Gaz naturel	Paille	Par tonne de paille	Par Hl d'éthanol
Coût de l'éthanol de blé	euros/hl	29,28	35,74		
dont coût paille	euros			57	6,23
Quantité paille	tonnes			1	0,11
Variation de revenu des agriculteurs	euros			10	1,09
Avantage emploi paille	euros			11,5	1,28
Avantage gaz à effet de serre					
LOWC ^{VP}	t CO2eq			0,39	0,04
INRA EGC INRA	t CO2eq			0,77	0,09
LOWC ^{VP}	euros			9,68	1,07
INRA EGC INRA	euros			19,25	2,14
Totaux Avantages paille					
LOWC ^{VP}	euros			31,18	3,44
INRA EGC INRA	euros			40,75	4,50
Coûts de l'éthanol avec avantages paille					
LOWC ^{VP}	euros/hl	29,28	32,30		
INRA EGC INRA	euros/hl	29,28	31,23		

La somme des avantages (gain des agriculteurs, emploi, effet de serre) varie entre 3,44 et 4,50.euros/hl d'éthanol (Tableau 27). La prise en compte des avantages rapproche sensiblement les deux coûts de l'éthanol (éthanol utilisant le gaz comme combustible et éthanol utilisant la paille) mais il subsiste tout de même un écart compris entre 1,95 euros (Hypothèse INRA) et 3,02 (Hypothèse LOWC^{VP}). Pour faire disparaître l'écart le plus faible soit 1,95 euros (hypothèse réduction gaz à effet de serre INRA), la valorisation de l'électricité devrait atteindre 200 euros/MWh, soit 3,6 fois plus que le prix proposé (hypothèse 55 euros MWh)

5.2. La production d'éthanol par hydrolyse enzymatique de la paille

Dans le cadre du programme national de recherche sur la biomasse, la production de biocarburants à partir de ressources ligno-cellulosiques est un enjeu important. Grâce notamment aux travaux américains, la production d'éthanol par hydrolyse enzymatique des co-produits ligno-cellulosiques a beaucoup progressé. Des évaluations économiques détaillées ont été réalisées par McAloon (10).

Tableau 28 Coûts des ressources lignocellulosiques

	Résidus de Maïs (USA)	Paille de Blé France
Rendement l ethanol/tonne brute	245	223
Ethanol/j hl besoins en co-produits en 1000 tonnes	2723	2723
prix des co-produits €/t brute	367	403
€/l ethanol	33,0	61
	0,13	0,27

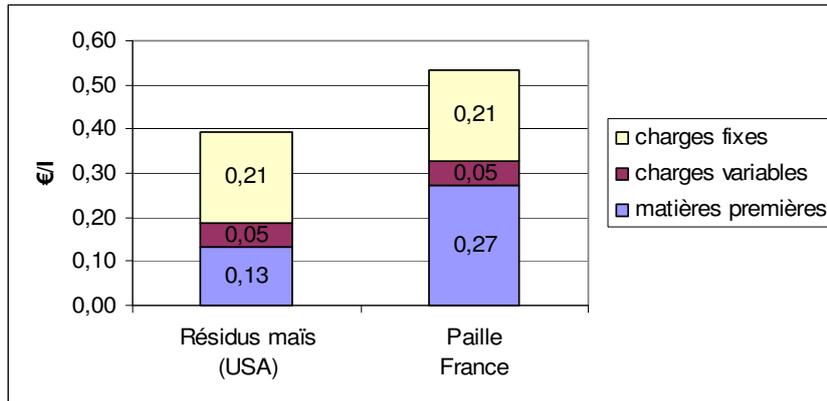
McAloon a comparé les coûts de l'éthanol de maïs et de résidus de maïs aux USA ; Atchison (11.) a récemment étudié les coûts de méthodes innovantes de récolte et de collecte des résidus de maïs. Leurs résultats ont été repris pour calculer les besoins en résidus pour alimenter une usine d'éthanol de 2723 hl/j (éthanol pur)¹² et le coût de la matière première (récoltée dans un rayon de 30 miles).

En France, Ogier(12) a fait le point sur la production d'éthanol à partir de produits lignocellulosiques. Il a retenu des rendements de 223 l (éthanol pur) par tonne de paille de blé (15% d'humidité). Ce rendement est un peu inférieur à celui obtenu à partir des résidus de maïs (Tableau 28).

Pour réaliser le bilan micro-économique, les coûts industriels issus des travaux américains ont été retenus. Le prix de la paille estimé par le modèle de collecte est de 60 euros/t (collecte de 400 000 tonnes). On observe (Tableau 29) que la paille dans les conditions françaises est deux fois plus coûteuse par litre d'éthanol que les résidus de maïs dans le contexte américain. La valeur fertilisante des résidus de maïs est estimée à 3,4\$/t de matière brute par Mc Aloon soit presque trois fois moins que la valeur fertilisante de la paille (9,1 €/t de paille).

¹² l'usine type retenu produit 25 000 000 de gallons/an d'éthanol à 5% d'essence (l'essence servant de dénaturant)

Tableau 29 Comparaison des coûts de l'éthanol de résidus de maïs et de l'éthanol de paille



Le coût de l'éthanol de paille est estimé à 53 euros/hl , soit 14 euros de plus que l'éthanol de résidus de maïs. Le coût de l'éthanol de co-produits lignocellulosiques est plus élevé que celui de l'éthanol de blé évalué à 30 euros/hl par l'étude LOWC^{VP}(8) et à 36 euros/hl par l'étude INRA SA2E (13).

6. Conclusions

En France le gisement en paille de blé et d'orges, disponible sans concurrence entre usages, est estimé entre 4,1 et 5,8 millions de tonnes de matières brutes (15% d'humidité) selon les rendements en paille retenus (variation de 3,5 à 4t/ha en fonction de la hauteur de coupe). Pour que ce gisement puisse être mobilisé sans causer de dommage à la fertilité des sols, les autres résidus couramment rencontrés en zone de grande culture (Paille de colza, cannes de tournesol et de maïs) doivent être impérativement enfouis.

Exprimée en d'autres unités , cette ressource est équivalente à 3,3-4,7 Mtep d'énergie primaire, 330000 à 470000 hectares de blé éthanol ou 2,5 à 3,6 millions de tonnes de charbon vapeur.

Pour étudier et optimiser le coût de collecte de la paille, une étude détaillée des opérations techniques a été réalisée par la FNCUMA, ARVALIS et l'INRA. Un modèle conçu avec EXCEL permet de calculer les coûts de collecte et de paramétrer de nombreuses données techniques ainsi que les distances de collecte. Ces coûts élémentaires sont ensuite utilisés par un modèle régional de minimisation des coûts d'approvisionnement qui permet de délimiter les aires de collecte des unités de transformation et de les localiser de manière optimale sur la base d'une maille géographique cantonale. Le comportement à offrir des producteurs de céréales qui implique une augmentation des prix de la paille en andains en fonction des quantités collectées a été introduit dans le modèle d'optimisation des collectes. Cet outil a été

appliqué dans une zone céréalière faite des six départements suivants : Ardennes, Marne, Aisne, Somme, Oise, Seine et Marne. D'après les travaux d'ARVALIS, 1,2 millions de tonnes de paille seraient disponibles dans cette région pour de nouveaux usages.

Dans cette région le coût de la paille (stricto sensu, c'est-à-dire sans profit des acteurs) varie entre 39 et 57 euros par tonne si la distance moyenne de collecte passe de 20 km à 150 km. Le mode de conditionnement est en grosses balles parallélépipédiques, système le moins coûteux. Ce n'est pas le transport qui induit les coûts les plus importants (dans une limite de 150 km) mais la récolte et le stockage.

En raison du comportement à offrir, le coût de la paille pour les utilisateurs est une fonction croissante des quantités offertes par les agriculteurs. Si 50% de la paille régionale, agronomiquement disponible, est récoltée, le prix « théorique de la paille », profit des acteurs compris, se situe autour de 60 euros/t. Le prix de la paille en andains se situe à 20 euros/t, soit 10 euros par tonne en plus de la valeur fertilisante. Le prix théorique passe à 70 euros/t si toute la paille disponible d'une région est collectée.

Ce mécanisme de l'offre implique une régulation du marché de la paille au niveau régional. Les utilisateurs ont intérêt à s'entendre afin d'éviter des situations de concurrence locale qui feraient flamber le prix de la paille et qui auraient pour résultat de dissuader les investisseurs. Il n'y a guère que les coopératives de collecte qui soient en mesure de pratiquer cette régulation.

Deux utilisations énergétiques de pailles ont été étudiées, la co-production de chaleur et d'électricité pour une usine d'éthanol de 100000 tonnes et la production d'éthanol par hydrolyse enzymatique (Unité de 2700 hl/j). Dans le premier cas étudié, l'utilisation énergétique des pailles améliore fortement le bilan énergétique et le bilan « gaz à effet de serre » de la filière mais induit des investissements importants qui pénalisent le coût de l'éthanol. L'utilisation de paille à la place du gaz naturel fait s'accroître le coût de l'éthanol de 29,3 à 35,7 euros/hl, soit un écart de 6,4 euros par hl. Cet écart passe à 1,95 (Hypothèse INRA) ou 3,02 euros par hl (hypothèse LOWC^{VP}) si on tient compte des avantages économiques découlant de l'augmentation de revenu agricole, des créations d'emplois et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Les coûts micro-économiques de l'éthanol produit par hydrolyse enzymatique des pailles ne sont pas pour l'instant très probants. Ils sont estimés à 53 euros/hl alors que le coût de l'éthanol de blé se situe autour de 30- 36 euros/hl.

La valorisation non alimentaire des pailles soulève quelques problèmes qui ne manqueront

pas de se poser si la mobilisation des ressources ligno-cellulosiques devient importante dans le futur :

- L'évolution du prix de la paille en fonction de la demande (disposition à offrir des producteurs),
- Les effets en retour de la valorisation non alimentaire des pailles sur l'offre de céréales, sur les revenus des utilisateurs traditionnels de paille et sur la sécurité fourragère des éleveurs en cas de sécheresse,
- Les impacts sur les coûts cultureux d'une surexploitation non alimentaire de la paille,
- La manière de réguler le marché de la paille au niveau régional,
- La complémentarité entre la paille et les co-produits de la filière bois (à plus long terme avec les cultures dédiées).

Bibliographie

Parties 1 et 2

Avalakki, U.K., Strong, W.M. et Saffigna, P.G., 1995. Measurements of gaseous emissions from denitrification of applied 15-N. 2. Effects of temperature and added straw. *Austr. J. Soil Res.*, 33: 89-99.

Cai, Z., Laughlin, R.J. et Stevens, R.J., 2001. Nitrous oxide and dinitrogen emissions from soil under different water regimes and straw amendment. *Chemosphere*, 42: 113-121.

Catt, J.A. et al., 1998. Strategies to decrease nitrate leaching in the Brimstone Farm Experiment, Oxfordshire, UK, 1988-93: the effect of straw incorporation. *Journal of Agricultural Science*, 131: 309-319.

Ecobilan, 2002. Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France, ADEME / DIREM.

Gabrielle, B., Da-Silveira, J., Houot, S. et Michelin, J., 2004. Using a bio-chemical index to simulate C-N dynamics in soils amended with urban waste composts. 2. Field-scale and environmental balance., manuscrit en préparation

Gabrielle, B. et Kengni, L., 1996. Analysis and field-evaluation of the CERES models' soil components: Nitrogen transfer and transformation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60: 142-149.

Gabrielle, B., Roche, R., Angas, P., Cantero-Martinez, C., Cosentino, L., Mantineo, M., Langensiepen, M., Hénault, C., Laville, P., Nicoullaud, B., Gosse G., 2002. A priori parameterisation of the CERES soil-crop models and tests against several European data sets. *Agronomie*, 22: 119-132.

Garnier, P. et al., 2003. Modelling carbon and nitrogen dynamics in a bare soil with and without straw incorporation. *European Journal of Soil Science*, 54(3): 555-568.

Hao, X., Chang, C., Carefoot, J.M., Janzen, H.H. et Ellert, B.H., 2001. Nitrous oxide emissions from an irrigated soil as affected by fertilizer and straw management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60(1-3): 1-8.

Hénault, C. et al., 2001. Laboratory kinetics of soil denitrification are useful to discriminate

soils with potentially high levels of N₂O emission on the field scale. *Agronomie*, 21: 713-723.

Hunt, R.G., Franklin, W.E., Welch, R.O., Cross, J.A. et Woodal, A.E., 1974. Resource and environmental analysis of nine beverage container alternatives, Midwest Research Institute for US EPA, Washington, DC.

Lambert, L., 1996. Application de l'analyse de cycle de vie en agriculture. Mémoire de DEA, Université Paris XIII.

Mitchell, R., Webb, J. et Harrison, R., 2001. Crop residues can affect N leaching over at least two winters. *European Journal of Agronomy*, 15(1): 17-29.

Reinhardt, G.A., 2000. Bio-energy for Europe. Which ones fit best? EC contract CT98-3832, IFEU, Heidelberg.

Silgram, M. et Chambers, B.J., 2002. Effects of long-term straw management and fertilizer nitrogen additions on soil nitrogen supply and crop yields at two sites in eastern England. *Journal of Agricultural Science*, 139: 115-127.

SOLAGRO, 2001. Faisabilité écologique de la valorisation énergétique de la paille en Ile-de-France, ARENE Ile de France / ADEME, Toulouse.

Soussana, J.F. et al., 2002. Usages du sol, stockage de carbone et effets connexes: état de l'art. In: D. Arrouays et al. (Editors), *Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* INRA Expertise collective, Paris, pp. 131-133.

Thomsen, I.K. et Christensen, B.T., 1998. Cropping system and residue management effects on nitrate leaching and crop yields. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 68(1-2): 73-84.

Tian, G.M., Cai, Z.C., Cao, J.L. et Li, X.P., 2001. Factors affecting ammonia volatilisation from a rice-wheat rotation system. *Chemosphere*, 42(2): 123-129.

Partie 3

1- Marsal, Sourie, Gorse Aspects économiques de la récupération des pailles, 1976, INRA-DGRST

- 2 -Requillart V – Valorisation énergétique des pailles de céréales , analyse économique des filières et de la concurrence entre usages INA-PG thèse de docteur Ingénieur 1984
- 3- Le Villio et Al. - Estimation des quantités de matière organique exogène nécessaires pour restaurer et entretenir les sols limoneux français à un niveau organique donné. Etude de gestion des sols, volume 8,1,2001, pp 47-63
- 4- The Centre for biomass technology, Straw for energy production, technology, environment, economy, second edition, 1998
- 5- Heat supply in Denmark The Danish Energy Authority January 2005
- 6- Renewable Energy Danish solutions , Background, Technology, Projects, The Danish Energy Authority January 2005
- 7- FNCUMA, ADEME, ITCF, INRA, Etude de la valorisation de la paille à des fins énergétiques, 2003,
- 8 -LOWC^{VP} 2004 Well-toWheel evaluation for production of ethanol from Wheat
- 9 ADEME direction de l'agriculture et des bioénergies, etude de l'impact potentiel de l'arrete fixant le tarif d'achat de l'électricité produite à partir de la biomasse, Etude réalisée par TRIVALOR Juillet 2002
- 10- McAloon, A., Taylor, F., Yee, W., Ibsen, K., Wooley, R. Determining the cost of producing ethanol from corn starch and lignocellulosic feedstocks, 2000, NREL, <http://devafdc.nrel.gov/pdfs/4898.pdf>
- 11 -Atchison, J.R.,Hettenhaus, J.R., Innovative methods for corn stover collecting, handling, Storing and transporting, 2003, NREL, <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/33893.pdf>
- 12 -Ogier, J.C., La production d'éthanol à partir de substrats lignocellulosiques, 1998, ADEME
- 13 -Sourie, JC, Treguer D, Rozakis S, L'ambivalence des filières biocarburants INRA sciences sociales, 8p, INRA SAE2

ANNEXES

**Annexe 1 : itinéraire technique des différentes rotations (C=Colza ; B=Blé ;
O=Orge ; Bett=Betteraves)**

		Colza	Maïs	Betterave	Blé	Orge	Blé
Rotation	Variété	Magelan	Prinz [†]	Emma300 d	‡	‡	‡
CBB	Date de .	25/08			27/10		27/10
	Densité de	237			350		350
	Ferti. N (date et	25/02 (70) 5/03 (130)			10/02 (80) 10/03 (90) 10/05 (45)		10/02 (50) 10/03 (130)
CBO	Date de .	25/08			27/10	27/10	
	Densité de	237			350	350	
	Ferti. N (date et	25/02 (70) 5/03 (130)			10/02 (80) 10/03 (90) 10/05 (45)	10/02 (80) 10/03 (50)	
MB	Date de .		20/04 8		27/10		
	Densité de				350		
	Ferti. N (date et		25/04 (90) 10/06 (80)		10/02 (80) 10/03 (90) 10/05 (45)		
BETTBB	Date de .			31/03 9	27/10		27/10
	Densité de			30/03 (100)	350		350
	Ferti. N (date et dose,			30/03 (110)	10/02 (80) 10/02 (50) 10/03 (110)		10/02 (80) 10/03 (110)
BETTBO	Date de .			31/03 9	27/10	27/10	
	Densité de			30/03 (100)	350	350	
	Ferti. N (date et			30/03 (110)	10/02 (80) 10/02 (50) 10/03 (110)	10/02 (80) 10/03 (50)	

Monoculture de blé	Date de	20/10
		350
	Densité de	10/02 (80) 10/02 (50)
	Ferti. N (date et	10/03 (110)

†: variété mixte ensilage - grain ‡: paramètres des variétés calés

En italique : pour la Somme uniquement

Résidus du précédent cultural (céréales d'hiver) :

	Tonnage de pailles à enfouir	C:N des pailles	Tonnage de racines	C: N des racines
Sans exportation	7.2	80	1.8	20
Avec exportation	2.0	80	1.8	20

Annexe 2 Utilisations des pailles de céréales

Année	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
PAILLE AVOINE:PROD.COMMERC.	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
PAILLE AVOINE:PROD.RECOLTEE	0,46	0,46	0,44	0,38	0,38	0,33	0,37	0,33
PAILLE BLE TENDRE:PROD.COMMERC.	2,09	1,82	1,96	2,18	2,53	2,60	2,79	2,66
PAILLE BLE TENDRE:PROD.RECOLTEE	10,83	9,78	10,06	10,27	11,39	11,21	11,82	11,42
PAILLE CEREALES ET AUTRES MELANGES:PROD.RECOLTEE	0,93	0,80	0,82	0,83	1,03	1,01	1,13	1,07
PAILLE CEREALES ET AUTRES MELANGES:PRODUCT.COMMERCIALISEE	0,09	0,07	0,08	0,13	0,13	0,11	0,11	0,10
PAILLE ORGE:PROD.COMMERC.	0,60	0,54	0,46	0,47	0,55	0,65	0,66	0,61
PAILLE ORGE:PROD.RECOLTEE	3,81	3,41	2,96	2,86	3,18	3,37	3,44	3,13
PAILLE SEIGLE:PROD.COMMERC.	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
PAILLE SEIGLE:PROD.RECOLTEE	0,15	0,14	0,13	0,13	0,14	0,13	0,13	0,11
PAILLES CEREALES TOTAL:PROD.COMMERC.	2,83	2,49	2,56	2,83	3,27	3,42	3,62	3,43
PAILLES CEREALES TOTAL:PROD.RECOLTEE	16,18	14,58	14,41	14,47	16,13	16,04	16,89	16,06

unités millions de tonnes matières brutes

Source SCEES

Annexe 3 Pailles exportables sans danger agronomique, 1999

	Blé tendre	Escourgeon et orge	Autres	total
Surface (Mio ha)	4,8	1,5	0,8	7,1
Rendement en paille (t/ha)	3,5	3,5	3,5	3,5
Quantité de paille produite (Mio t)	16,7	5,3	2,9	24,8
Quantité de paille récoltée (Mio t)	11,4	3,1	1,5	16,0
Quantité de paille commercialisée	2,7	0,6	0,7	4,0
Quantité de paille autoconsommée	8,7	2,5	0,8	12,0
Paille non récoltée	5,3	2,2	1,4	8,8
Paille récoltée en %	68,2	59,0	52,6	64,5
Pourcentage de paille exportable	0,55	0,55	0,55	0,55
Quantité de paille exportable (Mio t)	2,9	1,2	0,7	4,8

Annexe 4 Surfaces en céréales dans six départements du Nord du Bassin Parisien

Surfaces en céréales 1999	02 - Aisne	08 - Ardennes	51 - Marne	60 - Oise	77 - Seine-et-Marne	80 - Somme	surface :ha	quantité :paille (t)
AVOINE TOTAL SURF DEVELOPPEE (HA)	1200	1700	1200	750	1500	970	7320	25620
BLE DUR TOTAL SURF DEVELOPPEE (HA)	600	0	400	50	540	0	1590	5565
BLE TENDRE TOTAL SURF DEVELOPPEE (HA)	179000	61000	163000	154100	140610	174500	872210	3052735
ORGE ET ESCOURGEON TOTAL SURF DEVELOPPEE (HA)	37000	26900	84500	28150	37000	40150	253700	887950
SEIGLE SURF DEVELOPPEE (HA)	600	100	200	200	500	60	1660	5810
TRITICALE SURF DEVELOPPEE (HA)	100	150	200	180	100	20	750	2625
CEREALES SAUF RIZ TOTAL SURF DEVELOPPEE (HA)	234000	99400	268500	196730	203550	221200	1223380	4281830

Source : AGRESTE - Statistique Agricole Annuelle

Annexe 5 détail des coûts de collecte par opération technique (Synthèse établie à partir du dossier FNCUMA)

Valeur fertilisante de la paille en €/t

	Exportations		
	en Kg	prix des unités en €	€/t
N	4	0,58	2,3
P205	2	0,84	1,7
K2O	12	0,43	5,1
total			9,1

Consommation de carburant par tonne de paille

	litres/t
andainage	0,29
pressage	0,70
chargement remorque	0,72
déchargement	0,24
Roulage	0,22
chargement	0,24
déchargement	0,20
Transport	2,00
Total	4,62

distance transport km 80

Coût horaire tracteur 120CV

	unités	par an	par heure
Prix d'achat	€	50000	
taux d'intérêt	%	5%	
durée utilisation	ans	7	
valeur résiduelle	€	10485	
valeur actuelle	€	42549	
heures utilisation tracteur	jours	600	
heures totales	km	4200	
consommation L /h	litres		13,16
prix carburant	€	0,5	
consommation huile moteur L/h	litres		0,08
prix huile moteur	€	1,83	
Consommation huile hydraulique	litres		0,03
prix huile hydraulique	€	1,5	
Amortissement *	€	6583	11,0
Assurance	€	250	0,4
Entretien	€	1140	1,9
Carburant	€	3948	6,6
lubrifiant	€	115	0,19
coût en €	€	11921	19,9

Coût tracteur 180 Cv

	unités	par an	par heure
Prix d'achat	€	66320	
taux d'intérêt	%	0,05	
durée utilisation	ans	7	
valeur résiduelle	€	7487	
valeur actuelle	€	60999	
heures utilisation tracteur	jours	600	
heures totales	km	4200	
consommation L /h	litres		18,95
prix carburant	€	0,5	
consommation huile moteur L/h	litres		0,1
Prix huile moteur	€	1,83	
Consommation huile hydraulique	litres		0,04
Prix huile hydraulique	€	1,5	
amortissement*	€	9438	15,7
Assurance	€	332	0,6
Entretien	€	1140	1,9
Dépense de Carburant	€	5685	9,5
Dépense de lubrifiant	€	146	0,243
coût en €	€	16594	27,7

* y compris rémunération de l'investissement

Coût de l'andainage, andaineur 4 toupies

	unités	an	ha	heures	tonnes
Prix d'achat	€	30800			
taux d'intérêt	%	0,05			
durée amortissement	ans	7			
valeur résiduelle	€	6459			
valeur actuelle	€	26210			
hectares	hectares	3000		12,75	
durée utilisation heures/an	heures	235,3			
débit chantier tonnes	tonnes	10500		44,6	
Consommation	l/h				
prix du carburant	€/l	0,5			
Coût horaire de la main d'œuvre	€/h	10,7			
amortissement	€	4530	1,510	19,3	0,431
assurance	€	154	0,051	0,7	0,015
Entretien	€	6600	2,200	28,1	0,629
carburant	€	0			
coût hors MO	€	11284	3,76	48,0	1,075
Coût MO	€	2517,65	0,84	10,7	0,24
Coût avec MO	€	13801	4,60	58,7	1,314
tracteur 120cv	€	4675,0	1,6	19,9	0,4
Coût andainage	€	18476,2	6,2	78,5	1,8

Pressage balles haute densité 90x120 = 0.4t

	unités	an	ha	heures	tonnes	balles
prix d'achat	€	76225				
taux	%	0,05				
durée amortissement	ans	7				
valeur résiduelle	€	15985				
valeur actuelle	€	64865				
hectares	hectares		1500	7,68		
durée utilisation heures	heures		195,3			
débit chantier tonnes	tonnes		5250	26,9		
Consommation	l/h					
prix du caburant	€/l	0,5				
Main d'œuvre	€/h	10,7				
amortissement	€		11210	7,473	2,135	0,854
assurance	€		381	0,254	0,073	0,029
Entretien	€		8100	5,400	1,543	0,617
carburant	€		0			
ficelle	€		4950	3,300	0,943	0,377
coût hors MO	€		19691	13,13	4,694	1,877
Coût MO	€		2089,84	1,39	0,40	0,159
Coût avec MO	€		26731	14,52	5,092	2,037
tracteur 180cv	€		5401,9	3,6	1,0	0,412
Coût pressage	€		32132,7	18,1	6,1	2,448

Coût remorque plateau 12 m

	unités	an	balles	tonnes	heures
prix d'achat	€	12200			
taux	%	0,05			
durée amortissement	ans	12			
valeur résiduelle	€	1637			
valeur actuelle	€	11288			
durée utilisation	heures		760		
debit chantier **	tonnes		7200		8
capacité chantier	tonnes		6080		
balles /an	balles		18000		
amortissement *	€		1274	0,071	1,42
assurance	€		61	0,003	0,07
Entretien	€		89	0,005	0,10
carburant	€		0	0,000	0,00
Coût	€		1424	0,079	1,58

* y compris rémunération investissement ; ** chargement avec chargeur télescopique

Coût chargeur télescopique (chargement remorque)

	unités		an	heures	tonnes
prix d'achat chargeur	€	43100			
taux	%	0,05			
durée amortissement	ans	7			
valeur résiduelle	€	18076			
valeur actuelle	€	30254			
durée utilisation heures	heures		760		
temps chargement	tonnes				0,125
débit chantier tonnes	tonnes			8	
Consommation	l/h	5,75			
prix du carburant	€/l	0,5			
Coût de la main d'œuvre	€/h	10,7			
amortissement	€		5228	6,9	0,860
assurance	€		216	0,3	0,035
Entretien	€		1748	2,3	0,287
carburant	€		2185	2,9	0,359
coût hors MO	€		9377	12,3	1,542
Coût MO	€		8132	10,7	1,3375
Coût avec MO	€		17509	23,0	2,880

Chargeur télescopique (coût du déchargement)

	unités		an	heures	tonnes
prix d'achat	€	43100			
taux	%	0,05			
durée amortissement	ans	7			
valeur résiduelle	€	18076			
valeur actuelle	€	30254			
durée utilisation heures	heures		760		
temps de déchargement	heures	0,5			
débit chantier tonnes	tonnes		18240	24	0,04166667
Consommation	l/h	5,75			
prix du carburant	€/l	0,5			
Main d'œuvre	€/h	10,7			
amortissement	€		5228	6,9	0,287
assurance	€		216	0,3	0,012
Entretien	€		1748	2,3	0,096
carburant	€		2185	2,9	0,120
coût hors MO	€		9377	12,3	0,514
Coût MO	€		8132	10,7	0,45
Coût avec MO	€		17509	23,0	0,960

Coût du ramassage, transport, mise en tas , du champ au stockage

	€/heures	€/tonnes
Chargement chargeur télescopique	23,04	2,88
Remorque	1,58	0,20
tracteur 120 cv	19,87	2,48
chauffeur tracteur	10,70	1,34
trajet vide		0,20
trajet plein		0,33
déchargement chargeur télescopique	23,04	0,96
Coût attente remorque tracteur chauffeur		1,34
Total		9,73

remorque 12 tonnes

chargement		12
tonne/heure	tonnes	8
temps chargement	h et centièmes	1,5
déchargement		
tonne heure	tonnes	24
temps déchargement	h et centièmes	0,5
vitesse vide	Km/h	20
vitesse charge	Km/h	12
transport distance	km	1,5
temps trajet vide	h et centièmes	0,075
temps trajet plein	h et centièmes	0,13

nb le chauffeur de tracteur met la paille en tas

Coûts fixes et variables camion 20 tonnes de paille

Camion 20 tonnes	unités		par an	par jour	par km
Prix d'achat+ 0.1 camion sup panne	€	140000			
taux d'intérêt	%	0,05			
durée utilisation	ans	8			
valeur résiduelle	€	20000			
valeur actuelle	€	126463			
jours utilisation camion	jours		250		
Km moyen	km		80000	320	
consommation L au 100 km	litres	25			
coût carburant	€	1			
jours travail chauffeur	jours		225		
Coût du chauffeur	€		31300	139,1	0,39
Chauffeur de remplacement	€		3478	13,9	0,04
amortissement	€		19567	78,3	0,24
Assurance	€		8000	32,0	0,10
Frais généraux	€	10%	9000	36,0	0,11
Entretien	€		4000	16,0	0,05
Carburant	€		20000	80,0	0,25
Cout fixe journalier	€		62344	263,3	0,78
Cout variable km	€		24000	96,0	0,30

Côût du stockge sous bâche

			€/t
Location terrain	t/m2		0,07
bâche	€/m2		0,19
intérêt	taux	0,05	0,67
assurance	taux	0,05	1,34
Total			2,26

surface base balle	m2	2,88
nb balles hauteur		8
Poids balle	tonne	0,4
t/m2	tonne	1,11
bache €/m2	€	0,21
Location terrain	€/ha	730
valeur paille en stock	€/ha	26,73

Bilan du coût de collecte

Revenu agriculteurs	€/t		0,00	
valeur fertilisante	€/t		9,12	
andainage	€/t		1,76	
pressage	€/t		6,12	
Coût paille pressée				17,00
distance premier stockage	km	<input type="text" value="1,5"/>		
coût ramassage transport mise en stock	€/t		9,73	
Coût du stockage sous bache	€/t		2,26	
frais généraux au premier stockage	€/t		1,45	
Coût paille après stockage				31,38
Coût paille sortie stockage (pertes incluses)	€/t		26,73	
distance transport par camion 20t	km	<input type="text" value="80"/>		
coût transport et mise en stock usine	€/t	10	13,29	
frais généraux transport			0,66	
Coût transport paille y compris perte transport			14,10	
Coût stockage usine assurance			2,27	
total transport			16,37	
Coût paille en stock utilisateur	€/t			47,75
	F/t			313,23

hypothèses

Balles 90*120 400KG

transport premier stockage remorque 12t

transport camion plateau 20 tonnes

chargement déchargement chargeur télescopique

stockage sous bache

synthèse établi à partir dossier FNCUMA

nb rotation

1,65

Annexe 6 Coût moyen de collecte sur un rayon maximal R, densité de paille constante par unité de surface

Soit w la densité de paille sur un élément de rayon dx à la distance x de l'unité de collecte.

La quantité de paille disponible est égale $dq = 2w\pi x dx$

Soit un coût de collecte c linéaire avec la distance x d'où $c = ax + b$

Pour la quantité dq , le coût de collecte dc s'écrit : $dc = 2cw\pi x^2 dx + 2bw\pi x dx$

Le coût total C jusqu'au rayon maximal R s'écrit : $C = \int dc$ (intégrale de dc de 0 à R)

Soit $2cw\pi R^3/3 + 2bw\pi R^2/2$.

Le coût moyen est égal à $C/w\pi R^2$ soit $c \cdot 2R/3 + b$

Lorsque la répartition de la paille dans l'espace est homogène dans un cercle R ayant l'usine de collecte en son centre, tout se passe comme si toute la paille était concentrée au $2/3$ du rayon pour le calcul du coût moyen.

Annexe 7 Formules de calcul des coûts de transports

Soit les paramètres suivants:

D la distance usine lieu de stockage

H la durée de la journée de travail d'un transporteur

Tc le temps de chargement d'un camion

Td le temps de déchargement

Vv la vitesse du camion à vide

Vp la vitesse du camion à plein

C la quantité de paille transportée par camion

F les charges fixes d'un camion par jour y compris le chauffeur

O les charges proportionnelles au kilomètre

Soit les variables suivantes :

R nombre de rotations journalières

Q paille transportée par jour

Ot les charges variables par tonne de paille

Ft les charges fixes par tonne de paille

B coût total par tonne

Nombre de rotations

$$R = H / (Tc + Td + (D/Vv) + (D/Vp))$$

Quantité de paille transportée par jour

$$Q = R.C$$

Charges fixes du camion par tonne de paille

$$Ft = F / (R.C)$$

$$Ft = F.(Tc+Td)/H.C + (F.D/H.C) (1/Vv + 1/Vp)$$

Charges variables du camion par tonne de paille

$$Ot = (2.D.O)/C$$

Charges totales par tonne de paille

$$B = Ft + Ot$$

Soit coût par tonne

$$B = D.[(2O)/C] + D [(F/H.C).(1/Vv + 1/Vp)] + F(Tc+Td)/H.C \quad (I)$$

La formule I montre que le coût total de transport est bien linéaire en D ; il comprend trois termes : les charges variables par tonne, les charges fixes par tonne puis un terme constant.

Annexe 8 Besoins en paille pour couvrir les besoins en énergie d'une unité produisant 2 Mio hl/éthanol/an

D'après E Poitrat

Consommation énergétique d'une unité de production d'éthanol de 2Mhl et besoins en paille				
Consommation de vapeur			Mj/hl	1631.5
Consommation électricité			Kwh/hl	44.872
			Mj/hl	161.54
Consommation totale			Mj/hl	1793
Rendement du turboalternateur				0.85
Rendement de la chaudière				0.75
Rendement de l'ensemble				0.6375
Conso totale en énergie primaire			Mj/hl	2812.5
Conso totale pour 2Mhl			Moi Mj	5625.1
PCI paille			Mj/t	16200
Quantité de paille nécessaire			tonnes/an	347228.3
			tonnes/j	1052.2
			ha	86807.1

1 mètre cube de gaz	41,855	Mj
1 metre cube de gaz	2,80	kg CO2
1 metre cube de gaz	3,14	Kg de paille
1 tonne de paille	16200	Mj

Annexe 9 Simulations de cogénération électricité chaleur à partir du bois

Simulations de cogénération électricité-chaleur à partir de bois
Filière combustion vapeur - turbine contre pression

Taille de l'unité	20 MWe	
PCI du bois	2 MW.h / tonne	
Prix du bois livré usine	46 €/tonne	
Prix de vente de la chaleur	15 €/MW.h	
Durée annuelle de fonctionnement	6 000 heures	(à 80% en moyenne de la puissance nominale)
Durée d'amortissement	15 ans	
Rendement thermique total sur PCI	82 %	
Rendement électrique sur PCI	25 %	
Part de valorisation chaleur sur PCI	46 %	
Rendement global sur PCI	71 %	
Investissement par Mwe	1 829 €/Mwe	
Investissement total	36 588 k€	
Electricité produite	96 000 MW.h / an	
Chaleur produite	175 104 MW.h / an	
Quantité de bois nécessaire	192 000 tonnes/an	
Amort. par MW.h électrique produit	25 €/MW.h élec	
Coût de fonctionnement par MW.h électrique produit	13 €/MW.h élec	

Coût du KW.h 0,10 €/kW.h élec

La chaleur produite correspond à une chaufferie d'une puissance de **35,6 MWt** qui fonctionnerait en permanence à 80 % de sa puissance nominale (base) 6 000 heures par an

L'ensemble de l'installation a une puissance thermique au foyer de **133,3 MW**

si l'installation est alimentée par des taillis à courtes rotation d'eucalyptus produisant **8 t.m.s/an** il faudra environ **12 000 ha de plantations**

Source ADEME

Figures, Tableaux, graphiques et annexes

Figure 1. Filières étudiées dans le présent projet. 7

Figure 2. Effet du type de sol et du site climatique sur le rendement en blé simulé par CERES.

Les bâtons correspondent aux moyennes calculées sur l'ensemble des rotations et des années climatiques pour chaque combinaison sol/climat. Deux séries de barres d'erreur sont présentées : la première correspond à l'écart-type sur les différents types de rotations combinées à différentes fréquences d'exportation des pailles (n=20), et la deuxième à la moyenne des écarts-types liés à la variabilité inter-annuelle du climat (n=31). La dernière valeur provient des statistiques du SCEES pour la région

Champagne-Ardennes, sur la période 1980-1995. 13

Supprimé : 13

Figure 4. Effet de la fréquence d'exportation des pailles sur les pertes en N₂O (haut), nitrate (milieu), et les émissions d'ammoniac (bas) dans la Marne et la Somme, pour les différentes rotations. Les flux sont exprimés en kg N/ha/an. 20

Figure 5. Représentation schématique des systèmes et sous-systèmes étudiés. La différence entre le système de référence (S1) et le système avec valorisation énergétique des pailles (S2) se situe au niveau des modules en rouge. 23

Figure 6. Effet de la fréquence d'exportation des pailles sur les impacts des systèmes S1, S2.1 (50% d'exportation), et S2.2, en ce qui concerne les besoins en énergie primaire non renouvelable, l'effet de serre, la pollution photochimique, et l'eutrophisation. Les émissions sont ventilées entre les différentes phases du cycle de vie de l'éthanol, pour le cas de la Marne. Légende des phases : AGRICULT=production agricole ; TRANSPORT=transport champ-usine des pailles et des grains ; EtOH=conversion en éthanol des grains dans l'usine ; COMBUSTION=combustion des pailles et élimination des cendres. 31

Figure 7 : Représentation du réchauffement global sur 100 ans pour les trois scénarii en fonction de l'allocation massique en drèches. 33

Figure 8 : Représentation des coefficients applicables par impact lorsque la distance de transport des pailles jusqu'à l'unité de transformation est multiplié par 5. 34

Figure 9. Effet de la fréquence d'exportation des pailles sur les impacts des systèmes S1, S2.1 (50% d'exportation), et S2.2, en ce qui concerne l'effet de serre, l'acidification et l'eutrophisation. Les émissions sont ventilées entre les différentes phases du cycle de vie de l'éthanol, pour le cas de la Marne. Légende des phases : AGRICULT=production agricole ; TRANSPORT=transport champ-usine des pailles et des grains ; EtOH=conversion en éthanol des grains dans l'usine ; COMBUSTION=combustion des pailles et élimination des cendres. 36

Figure 10 Taux d'exportation des pailles (Source ARVALIS) 42

Supprimé : 36

Figure 11 Utilisations des pailles en 1996 au Danemark (Millions de tonnes) 43

Supprimé : 36

Figure 12 Localisations optimales de trois usines de traitement des pailles	56	Supprimé : 36
Tableau 1 Pourcentage d'occupation de la surface agricole utile par les différentes classes pédologiques de sols dans les 3 régions concernées par l'étude (source : Service Infosol, INRA Orléans).	10	
Tableau 2 Propriétés des sols utilisés dans les simulations pour représenter les différentes classes de sols de la région d'étude.	11	
Tableau 3. Normales climatiques pour les sites simulés.	13	Supprimé : 13
Tableau 4. Emissions directes retenues pour les deux Départements, pour la rotation colza-blé-blé, avec trois systèmes : pas d'exportation de pailles (S1), exportation une année sur 3 (S2-1), exportation 2 années sur 3 (S2-2). Les émissions sont moyennées sur l'ensemble des années climatiques simulées.	18	
Tableau 5. Quantités d'énergie mobilisées par l'usine de production d'éthanol, par litre d'éthanol produit, dans les 2 systèmes étudiés. Les consommations sont exprimées en volumes par source d'énergie, ainsi qu'en énergie primaire.	22	
Tableau 6. Valeur fertilisante de la paille.	24	
Tableau 7. Source des données techniques et environnementales sur les différents sous-systèmes étudiés.	25	
Tableau 8. Impacts calculés pour les systèmes S1 (référence) et S2, dans la Marne sur sol de rendzine. Deux fréquences d'exportation des pailles sont simulées pour S2:50 et 100% des pailles produites, correspondant à S2.1 et S2.2. Pour les systèmes S2, les flux sont exprimés en différentiel par rapport à S1. L'unité fonctionnelle est le litre de bio-éthanol. La dernière colonne exprime les différences entre S1 et S2 (moyenne de S2.1 et S2.2) par kg de pailles utilisées.	30	
Tableau 9. Même tableau que le précédent, pour le sol de limon profond dans la Somme.	30	
Tableau 10: Impacts calculés pour différentes valeurs fertilisantes des pailles (VF) pour le système S2.2 (fréquence d'exportation des pailles de 100% des pailles produites), dans la Marne sur sol argilo-limoneux. Les flux sont exprimés en différentiel par rapport à S1(système de référence sans export de paille). L'unité fonctionnelle est le litre de bio-éthanol.	32	
Tableau 11 : Résultats des impacts en fonction de la variation de l'allocation massique des flegmes pour une rotation colza-blé-blé dans la Marne (Mons en Chaussée).....	33	
Tableau 12 Paille exportable sans danger agronomique	38	Supprimé : 36
Tableau 13 Disponibilité en paille de blé et d'orges en fonction du rendement en paille	40	Supprimé : 36
Tableau 14 Importance énergétique du gisement en paille	41	Supprimé : 36
Tableau 15 Le gisement en paille (Millions tonnes) dans six départements céréaliers (source ARVALIS)	41	Supprimé : 36
Tableau 16 Le gisement par département en Millions de tonnes (Source ARVALIS).....	41	Supprimé : 36

Tableau 17 Coût de la paille en andains.....	45	Supprimé : 36
Tableau 18 Coûts des matériels.....	45	Supprimé : 36
Tableau 19 Autres hypothèses.....	47	Supprimé : 36
Tableau 20 Incidence de la vente de paille sur le revenu agricole d'une exploitation céréalière	50	Supprimé : 36
Tableau 21 Prix théoriques (en euros/t) et distances de collecte	56	Supprimé : 36
Tableau 22 Optimisation de la collecte site de Ribemont, prix de la paille en andains variable endogène.....	57	Supprimé : 36
Tableau 23 Effet d'un nouvel entrant sur le prix de la paille.....	58	Supprimé : 36
Tableau 24 Effet d'une collecte importante 500000 tonnes sur le prix de la paille.....	58	Supprimé : 36
Tableau 25 Hypothèses de Prix.....	60	Supprimé : 36
Tableau 26 Impacts micro-économiques de l'utilisation des pailles comme source d'énergie dans une unité de production de 100 000 tonnes d'éthanol	60	Supprimé : 36
Tableau 27 Prise en compte des créations d'emploi pour la collecte de paille et de la réduction des émissions gaz à effets de serre.....	62	Supprimé : 36
Tableau 28 Coûts des ressources lignocellulosiques.....	63	Supprimé : 36
Tableau 29 Comparaison des coûts de l'éthanol de résidus de maïs et de l'éthanol de paille.	64	Supprimé : 36
Graphique 1 Quantités de paille de blé et d'orge, 1999, rendement 3,5 tonnes (M brutes/ha)	40	Supprimé : 36
Graphique 2 besoins en main d'oeuvre	46	Supprimé : 36
Graphique 3 Coût élémentaire de collecte, distance de transport 50 km	47	Supprimé : 36
Graphique 4 Coûts comparés de la récolte de paille au Danemark et en France	48	Supprimé : 36
Graphique 5 Consentement à offrir des producteurs de paille	48	Supprimé : 36
Graphique 6 Prix théorique de la paille, distance de collecte de 50 km	49	Supprimé : 36
Graphique 7 Coûts en fonction des distances et des revenus attribués aux acteurs de la filière	50	Supprimé : 36
Graphique 8 Réseau routier convergent vers le canton de Ribemont	52	Supprimé : 36
Graphique 9 Coûts de collecte de la paille en fonction des quantités collectées	53	Supprimé : 36
Graphique 10 Consommation moyenne de carburant par tonne de paille en fonction des quantités collectées.....	54	Supprimé : 36
Annexe 1 :itinéraire technique des différentes rotations (C=Colza ; B=Blé ; O=Orge ;Bett=Betteraves) 71		Supprimé : 36
Annexe 2 Utilisations des pailles de céréales 72		Supprimé : 36
Annexe 3 Pailles exportables sans danger agronomique,1999 73		Supprimé : 36
Annexe 4 Surfaces en céréales dans six départements du Nord du Bassin Parisien 73		Supprimé : 36
Annexe 5 détail des coûts de collecte par opération technique (Synthèse établie à partir du dossier FNCUMA) 74		Supprimé : 36

Annexe 6 Coût moyen de collecte sur un rayon maximal R, densité de paille constante par unité de surface 80

Supprimé : 36

Annexe 7 Formules de calcul des coûts de transports 81

Supprimé : 36

Annexe 8 Besoins en paille pour couvrir les besoins en énergie d'une unité produisant 2 Mio hl/éthanol/an 83

Supprimé : 36

Annexe 9 Simulations de cogénération électricité chaleur à partir du bois 84

Supprimé : 36