

Valorisation énergétique des fourrages :

Comparaison de trois filières, enjeux et opportunités

F. Ghysel^(1,3), B. Godin^(1,4), C. Flamin⁽⁵⁾, P. Delfosse⁽⁶⁾,
J. Delcarte⁽¹⁾, D. Stilmant⁽²⁾

1 : Centre wallon de Recherches agronomiques - Unité Biomasse, bioproduits et énergies, Chaussée de Namur, 146, B-5030 Gembloux (Belgique) ; f.ghysel@cra.wallonie.be

2 : Centre wallon de Recherches agronomiques - Unité Systèmes agraires, territoires et technologie de l'information, Rue de Serpont, 100, B-6800 Libramont (Belgique)

3 : Université catholique de Louvain - Unité de Génétique - Unité de Génie biologique, Croix du Sud, 2/19, B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgique)

4 : Université catholique de Louvain - Unité de Génie biologique, Croix du Sud, 2/19, B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgique)

5 : Agria Lorraine, 2, avenue de la Forêt de Haye, BP 172, F-54505 Vandoeuvre-lès-Nancy (France)

6 : Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann - Département Environnement et Agro-biotechnologies, 41, rue du Brill, L-4422 Belvaux (Luxembourg)

Résumé

La directive européenne 2009/28/CE vise à ce que les énergies renouvelables constituent 20% de la consommation totale d'énergie et 10% de la consommation d'énergie dédiée aux transports d'ici 2020.

Dans ce contexte, l'agriculture peut se poser la question de la valorisation énergétique d'une production destinée préalablement à l'alimentation animale. Ce choix va en partie dépendre de l'influence de modifications imposées ou choisies par les filières agricoles alimentaires et non alimentaires qui pourraient faciliter ou, au contraire, limiter ce potentiel de production énergétique.

Après une description des trois principales filières de valorisation énergétique de la biomasse, la combustion, la biométhanisation et la production de bioéthanol de deuxième génération, leurs principales caractéristiques, points faibles et rendements sont analysés. Si les performances énergétiques peuvent être sommairement comparées, les pertinences environnementale, économique et sociétale des différentes valorisations doivent encore faire l'objet d'études et de développement d'outils d'analyse, notamment à cause d'incertitudes liées aux données et à la dynamique du contexte socio-économique.

Introduction

L'augmentation exponentielle de la démographie, de l'activité industrielle et les interactions entre les aspects écologiques et économiques, comme dans le cas du réchauffement climatique, peuvent avoir des conséquences importantes. Dans ce contexte, avec l'épuisement des énergies fossiles, une des préoccupations majeures est la dépendance énergétique de nos sociétés.

La directive européenne 2009/28/CE vise à ce que la part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie et celle destinée au transport soit respectivement de 20% et 10% d'ici à 2020. Le but poursuivi par l'Union Européenne (Union Européenne, 2003) est de :

- réduire les émissions de gaz à effet de serre ;
- garantir la sécurité d'approvisionnement en énergie ;
- produire des énergies durables, compétitives et diversifiées ;
- créer de l'emploi, innover et être compétitif dans le domaine des énergies renouvelables.

La question se pose alors des enjeux et des opportunités que pourraient saisir et relever les agriculteurs en contribuant au problème énergétique. **Comment partager les productions agricoles, et spécialement fourragères, entre les valorisations alimentaires et non alimentaires ? Avec quels résultats et quels impacts ?**

Le projet **ENERBIOM** (INTERREG IV-A), financé en partie par les fonds européens FEDER, vise à définir et diffuser des itinéraires de production agricole de biomasse-énergie, prenant en compte les différentes dimensions agro-écologiques, en vue de développer durablement des filières adaptées à la « Grande Région ». Ce projet a débuté en 2009 et doit se terminer en 2011. Les résultats doivent aboutir à la définition d'un potentiel de production de biomasses végétales destinées à la production de bioénergies par les trois voies de valorisation : biocarburants, biogaz et biocombustibles.

La première action du projet est d'**explorer le potentiel de production** des principales cultures dédiées, **sous une diversité de conditions pédoclimatiques, allant du plateau lorrain au plateau ardennais et à la région de l'Eifel en Allemagne, en passant par la Hesbaye liégeoise en moyenne Belgique**. Cette comparaison est, par ailleurs, réalisée pour **différents niveaux d'intensification**, afin de définir la place que pourraient prendre ces cultures dans des zones écologiques sensibles. Cette exploration s'accompagne de la définition de la valeur d'utilisation de plantes énergétiques au sein de différentes filières que ce soit en tant que biocombustible, biomasse méthanogène ou support à la production de bioéthanol de deuxième génération, produit au départ des fractions cellulosique et hémicellulosique.

Les premiers résultats du consortium ENERBIOM sont présentés ici, ainsi que ceux issus des projets BIOETHA2 (CRA-W), LUXCYCLE (CRP-GL *et al.*), AGRICOMETHANE (INTERREG III-A) et OPTIBIOGAZ (INTERREG IV-A) sur le potentiel de valorisation des biomasses fourragères (herbe, maïs, sorgho) avec une finalité énergétique. Quand elle est possible, une comparaison à d'autres sources énergétiques comme les cultures dédiées telles le miscanthus et le panic érigé, que nous considérerons comme non fourragères, est réalisée.

1. Les voies possibles de valorisation énergétique des fourrages

– Biomasse lignocellulosique et fourrages

Les productions fourragères telles que les ensilages d'herbe et les foin, mais aussi l'ensilage de maïs, les céréales immatures ensilées, les betteraves fourragères, l'épeautre... sont autant d'aliments auto-produits. Dans le domaine énergétique, ces productions peuvent se rattacher au terme « biomasse », qui désigne la matière organique biodégradable et non fossilisée issue des plantes, animaux et microorganismes. Ce terme inclut les produits, coproduits, sous-produits et déchets issus de l'agriculture, comme ceux de la forêt et des industries associées, les déchets organiques solides urbains et industriels, ainsi que les gaz et liquides issus de la dégradation de matériaux organiques biodégradables et non fossilisés (DEMIRBAS *et al.*, 2009). Trois grandes catégories sont donc généralement distinguées : la biomasse issue du bois, de l'agriculture et des déchets (ROSSILO-CALLE *et al.*, 2007).

– Equilibre entre valorisation fourragère et énergétique de la biomasse

Le choix de la valorisation énergétique d'une production destinée préalablement à l'affouragement peut résulter de modifications imposées ou choisies par les filières agricoles alimentaires et non alimentaires. Ces évolutions pourraient faciliter ou au contraire limiter ce potentiel de production de bioénergies issues des productions agricoles.

Les principaux **éléments qui déterminent le potentiel de production de bioénergie** ont été identifiés au travers de plusieurs études (DOOS et SHAW, 1999 ; BUSCH, 2006 ; SMEETS *et al.*, 2007 ; ROWE et TAYLOR, 2009). Les productions agricoles sont le résultat de nombreuses interactions complexes incluses dans l'ensemble du système socio-économique et très difficiles à quantifier. Pour ces auteurs, ce système comporte notamment les éléments suivants :

- la croissance de la population ;
- la consommation quantitative et qualitative par habitant de denrées alimentaires ;
- les rendements des cultures et l'efficacité des systèmes de productions animales ;
- les restrictions territoriales et environnementales ;
- les conditions pédoclimatiques et phytosanitaires ;
- les coûts du travail et de la production agricole ;
- les politiques et directives européennes.

La consommation alimentaire et le ratio qualitatif viande/végétaux peuvent libérer des terres en optimisant la production alimentaire en termes calorifiques et nutritionnels ou, au contraire, augmenter l'emprise des cultures fourragères dans le cas de développement d'une production animale moins efficiente.

Les biotechnologies et les progrès agronomiques peuvent permettre une augmentation de productivité pour certaines denrées alimentaires, et donc inciter l'agriculture à se spécialiser sur une production, freinant ainsi l'ouverture à de nouvelles spéculations comme la bioénergie. Dans le même ordre d'idées, le développement des cultures lignocellulosiques énergétiquement dédiées tendra forcément à favoriser la production de biomasse, mais pourrait développer une forme de réticence sociétale au développement des biocarburants.

Le milieu, au sens environnemental du terme, et les défis en matière de biodiversité, de paysage mais aussi d'autres facteurs comme l'urbanisation ou le développement économique modifieront l'occupation du sol agricole, bloqueront la mise en place d'installations de valorisation ou les favoriseront, en libérant des débouchés par exemple. Les conditions pédoclimatiques joueront également un rôle en fonction de leurs avantages concurrentiels pour l'une ou l'autre spéculation.

Enfin, en fonction des volontés sociétales, les politiques agricoles, commerciales et les directives européennes favoriseront ou freineront le développement de la valorisation énergétique de la biomasse, même si actuellement elles sont plutôt en sa faveur.

Pour conclure, nous avons considéré cet équilibre de manière isolée du système global dont il fait partie, mais **il ne faut pas oublier que des événements extérieurs au système agricole peuvent avoir un impact.** Si une troisième valorisation autre que fourragère ou énergétique, comme par exemple la chimie « verte » ou « à haute valeur ajoutée », venait à créer une demande importante de biomasse, un déséquilibre pourrait se produire. Il se traduirait par une évolution forcée des variables agricoles de façon à développer la spéculation lignocellulosique ou, si tel n'est pas le cas, vers une autre « ressource » comme la sylviculture.

– Biomasse, « biofuel » et bioénergie

Quelle que soit sa valorisation, la biomasse est une forme de stockage chimique de l'énergie solaire. Ce processus photosynthétique, dont le rendement est inférieur à 1% de l'énergie solaire fournie, convertit le CO₂ et l'eau en carbone organique au sein de la cellule végétale. Il peut être considéré comme cyclique, car le CO₂ rejeté lors de la valorisation énergétique est de nouveau mobilisable pour la photosynthèse (MCKENDRY, 2002a). Face à la menace de l'effet de serre, l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques a, contrairement aux énergies fossiles, un rôle neutre puisque les végétaux restituent en partie le carbone stocké durant leur croissance. Enfin, par rapport à d'autres énergies renouvelables telles que le solaire ou l'éolien, **la biomasse permet une**

production d'énergie « à la demande » et non en fonction des conditions climatiques, **puisqu'elle peut être stockée.**

La FAO différencie la biomasse sous sa forme ressource (« *Biomass* ») de la forme commerciale (« *Biofuel* ») et considère que le terme « Bioénergie » correspond à la conversion énergétique de celle-ci (FAO, 2004). En effet, **la biomasse est transformée dans un premier temps en biocombustible solide** (comme le pellet de bois ou la balle de foin par exemple), **gazeux** (méthane) **ou liquide** (bioéthanol ou biodiesel...) **avant d'être convertie en énergie thermique, mécanique ou électrique.** Dans le cas de la biocombustion, nous pourrions considérer que la biomasse est valorisée directement en énergie (thermique) alors que, dans le cas de la digestion anaérobie et du bioéthanol, le contenu énergétique de la biomasse passe sous une forme chimique intermédiaire. Or la conversion d'un type d'énergie en un autre s'accompagne toujours de pertes irréversibles dissipées de façon inversement proportionnelle au rendement de chaque technologie.

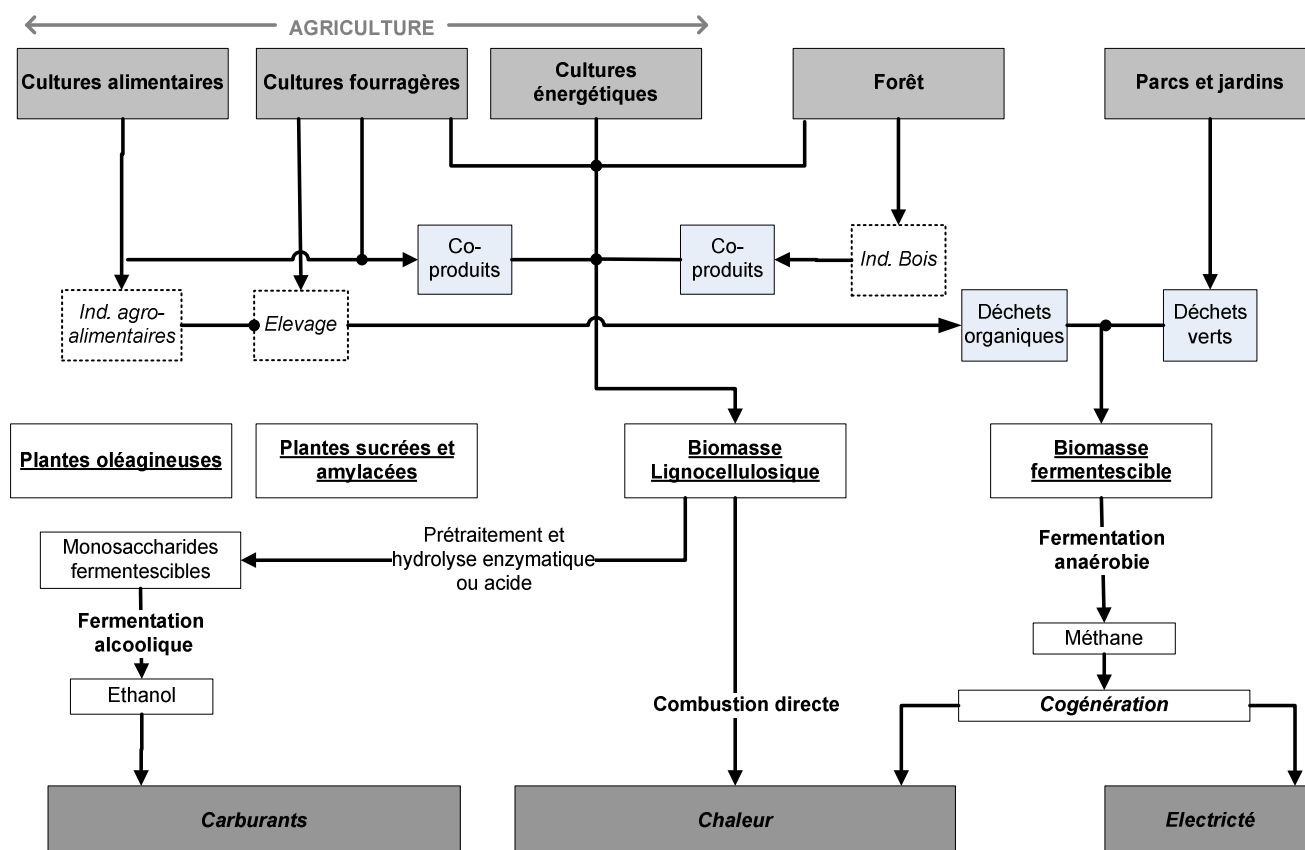
– Valorisation énergétique de la biomasse

Il existe plusieurs processus de production de bioénergie, allant des utilisations conventionnelles de la biomasse, comme la combustion du bois, aux processus modernes de production comme la transformation de sucre et de féculents en éthanol, à des technologies plus avancées comme la gazéification de copeaux de bois pour la production de carburants pour les transports (SCHENKEL et BENABDALLAH, 2005).

Nous considérons ici trois valorisations énergétiques de la biomasse qui constituent trois filières principales (Figure 1) : la **combustion**, le **biogaz** et les **biocarburants**. Ces filières mobilisent deux processus contrastés :

- les procédés thermochimiques : combustion directe de la biomasse avec éventuellement des procédés de cogénération, pyrolyse ou gazéification en améliorant les biocombustibles ;
- les procédés biochimiques : fermentation (alcool) ou biométhanisation (biogaz).

FIGURE 1 – Différentes ressources et valorisations de la biomasse (schéma non exhaustif).



La qualité de la bioénergie produite peut être aussi importante que sa quantité, notamment en regard de son mode de consommation. En effet, la biomasse est susceptible de fournir de l'énergie sous diverses formes : chaleur, électricité, combustibles et/ou carburants gazeux, liquides et solides au travers des trois types de technologies abordées (MCKENDRY, 2002b).

Pour comparer les trois filières, nous retenons toujours ici une **valorisation énergétique finale sous forme thermique**. Les rendements sont exprimés suivant le pouvoir calorifique du produit obtenu. Le pouvoir calorifique représente la quantité d'énergie contenue dans une unité de masse de combustible. On distingue le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) et le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI). Ce dernier représente l'énergie de combustion (en joule) rapportée à la masse (en kilogramme) d'un combustible brûlé en présence d'excès d'air, dont la chaleur de condensation de l'eau a été soustraite.

Dans un but de comparaison, les potentiels énergétiques (en J) de production de bioéthanol et de méthane sont obtenus en les multipliant par leur PCS unitaire respectif. Précisons que, dans le cas de la filière du bioéthanol, la lignine contenue dans le résidu de fermentation peut être valorisée comme biocombustible solide ; elle possède en effet un PCS important d'environ 25 GJ/tonne et elle est la troisième substance la plus présente dans les fourrages (HAMELINCK et al., 2005b).

2. Principes des trois valorisations énergétiques

– La biocombustion

La combustion est une réaction chimique exothermique d'oxydation qui décompose totalement le combustible. La valorisation énergétique de biomasses diverses demande une stabilité et une connaissance de leurs caractéristiques. En effet, que ce soit en combustion complète ou incomplète, de multiples problèmes peuvent se poser si le combustible n'est pas adéquat. Ainsi, il est important de connaître les caractéristiques physiques et chimiques des productions agricoles pour en déterminer les risques éventuels lors de la combustion. En cas de risques, seuls des essais à échelle réelle sur chaudières tests permettront de valider ou non la qualité du combustible. Les premières caractéristiques à connaître sont l'humidité relative du combustible, la composition chimique élémentaire, le pouvoir calorifique, la teneur en cendres et une estimation de la production de mâchefers et de fumées acides.

– Le bioéthanol de deuxième génération

Les biocarburants de deuxième génération peuvent être produits à partir de substrats carbonés comme les cultures lignocellulosiques dédiées. Ces biocarburants tentent d'augmenter l'efficacité énergétique et économique en utilisant l'ensemble des plantes (cellulose et hémicelluloses). Deux voies sont à identifier : la voie thermochimique (filiale « *Biomass to Liquid* » ou BtL) qui produit du gazole et du kérosène de synthèse, et la voie biologique qui produit de l'éthanol et qui sera analysée ici. **Le bioéthanol provient de la fermentation des monosaccharides issus de l'hydrolyse de la cellulose et des hémicelluloses, hydrolyse négativement affectée par la lignine** imprégnée sur le réseau de cellulose-hémicelluloses. La lignine a également une action inhibitrice sur les microorganismes responsables de la fermentation (CARPITA et al., 2000 ; HOUGHTON et al., 2006). L'efficacité énergétique du procédé de production du bioéthanol de deuxième génération dépendra aussi du type de biomasse et de ses teneurs en principaux composés constitutifs (cellulose, hémicelluloses et lignine).

– La biométhanisation

La production de biogaz à partir de la biomasse n'est pas un concept nouveau, mais la volonté de mieux maîtriser cette voie énergétique est devenue un enjeu international au cours des dernières années. Parmi les **avantages à méthaniser la matière organique**, on peut citer :

- la conversion en énergie des plantes énergétiques, des effluents de la production animale et des résidus organiques agricoles et industriels ;
- la contribution à la diminution de la production néfaste de CO₂ d'origine fossile grâce à l'utilisation des produits directs ou indirects de la photosynthèse ;
- l'assainissement des effluents de la production animale et des déjections humaines ;

- la réduction de la dépendance énergétique pour la production des engrais puisque tous les éléments fertilisants N, P, et K et micro-éléments se retrouvent dans les digestats.

3. Composition de la biomasse fourragère et impacts sur les valorisations énergétiques

– Composition chimique élémentaire et composés inorganiques, impacts sur la production de mâchefer et fumées lors de la combustion

La composition élémentaire correspond aux taux de carbone (C), hydrogène (H), azote (N), soufre (S), chlore (Cl) et oxygène (O) (par différence) présents dans la plante. Cette composition est utile pour estimer certaines caractéristiques de la combustion, telles que la capacité du combustible à fournir de l'énergie (taux de C et de H) ou les risques d'émissions de gaz et particules polluants, corrosifs et dangereux (NO_x, HCl, HAP, COV, dioxines...). Les différentes biomasses lignocellulosiques agricoles présentent pour la plupart des **taux supérieurs en chlore et en azote à ceux du bois** (Tableau 1). La combustion des cultures fourragères plus riches en ces éléments est donc plus **favorable aux risques de corrosion et d'émission de gaz polluants**. En effet, l'azote et le chlore forment des oxydes d'azote (NO_x) et de l'acide chlorhydrique (HCl) lors de la combustion. Ces différents acides sont évacués dans les fumées. Si le point de rosée acide de ces fumées est atteint lors de l'échange de chaleur ou dans le conduit d'évacuation des fumées, la condensation de ces acides provoque des phénomènes de corrosion.

TABLEAU 1 – Compositions élémentaires du bois et de biomasses lignocellulosiques agricoles (BIOBIB, 2010).

Biomasse	Composition élémentaire							Composition des cendres									
	C	H	N	S	Cl	O (diff)	Cen- dres	SO ₃	Cl	P ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
	(%massique mat. sèche)							(%massique)									
Bois	49,00	5,70	0,40	0,10	0,10	41,80	2,90	–	–	4,50	16,90	10,70	7,30	31,00	5,20	0,80	9,50
Chanvre	45,70	6,30	0,60	0,00	0,10	44,10	3,20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Froment (paille)	44,33	5,32	0,57	0,14	0,50	42,93	6,21	3,65	3,27	2,13	51,51	0,40	0,79	6,57	1,73	0,56	17,07
Froment (plante)	46,71	5,50	1,23	0,09	0,33	41,20	4,94	1,33	2,79	5,53	45,23	0,24	0,38	4,10	1,80	0,10	13,98
Herbe (intensive)	45,11	4,90	2,01	0,15	1,09	36,81	9,93	3,85	7,30	8,70	29,35	0,24	0,24	8,60	2,60	0,99	35,20
Herbe (prairie)	46,31	5,20	3,37	0,20	0,75	34,82	9,35	3,46	6,06	7,57	29,50	0,56	0,97	9,97	2,77	0,36	28,00
Maïs (épis)	44,62	5,37	0,41	0,05	1,48	39,57	8,50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Maïs (plante)	46,91	5,47	0,56	0,04	0,25	42,78	3,99	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Maïs (tige)	47,09	5,97	0,74	–	0,05	44,42	1,73	1,92	4,04	5,69	33,80	0,58	0,45	6,70	3,63	0,41	30,25
Miscanthus (3ans)	48,49	5,42	0,56	0,05	0,21	41,81	3,46	3,16	2,88	2,78	52,76	0,30	0,18	5,62	3,11	0,16	19,41
Orge d'été (paille)	46,79	5,53	0,41	0,06	0,41	41,94	4,86	4,43	11,90	2,73	33,80	0,28	0,28	8,30	2,22	4,11	26,10
Orge d'hiver (paille)	46,86	5,31	0,73	0,12	0,98	40,12	5,88	0,91	2,25	1,22	59,40	0,22	0,38	5,10	0,77	0,26	5,60
Panic érigé (été)	41,21	5,03	0,31	0,04	0,01	51,07	2,33	–	–	0,07	1,43	0,04	0,25	0,12	0,01	0,19	0,40
Panic érigé (hiver)	42,40	–	1,34	0,11	0,47	48,68	7,00	–	–	0,07	1,43	0,03	0,04	0,25	0,12	0,01	0,19
Seigle (paille)	47,57	5,89	0,42	0,09	0,23	42,40	3,40	2,37	3,64	2,75	45,55	0,20	0,25	6,33	1,44	0,08	15,50
Sorgho (fibres)	42,80	–	0,84	0,10	0,37	47,79	8,10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Tournesol	50,50	5,90	1,30	0,10	0,40	34,90	6,90	8,36	–	3,64	20,46	1,20	–	10,84	6,10	0,91	30,01

Les cendres sont les résidus récupérés en fin de combustion. On distingue deux types de cendres : les "cendres foyer", qui forment un dépôt résiduel de la combustion des composés inorganiques du combustible au niveau du foyer et les "cendres volantes", composées de fines particules d'imbrûlés solides, de minéraux ou de complexes volatils et qui peuvent être émises à la sortie de cheminée, entraînées par les fumées. Ces cendres peuvent s'agglomérer sur les parois froides des échangeurs ou encore réagir avec ces parois créant des phénomènes de corrosion.

Les composés inorganiques présents dans la biomasse agricole sont en grande partie des alcalins et des métaux. Excepté le chlore et le soufre, ces composés sont récupérés en fin de combustion sous forme d'oxydes (respectivement SO₃, P₂O₅, SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂) dans les cendres foyer (Tableau 1).

La plupart des composants minéraux ont des températures de fusion supérieures à 1 500°C (Tableau 2). Une teneur élevée en K₂O et P₂O₅ à températures de fusion basses peut contribuer à la **formation de mâchefer**. Le potassium (K), souvent considéré comme le principal catalyseur lors de la production de mâchefer, est présent en grande quantité dans les cultures fourragères (Tableau 1). Composé de blocs de silice et de minéraux compacts, le mâchefer étouffe la combustion et bouche l'évacuation des cendres ; les différents composés inorganiques peuvent se lier par une fusion partielle et former des mélanges eutectiques qui, par définition, fondent à des températures plus basses que leurs constituants respectifs, aggravant le phénomène.

TABLEAU 2 – Températures de fusion des principaux oxydes issus de la combustion de biomasse agricole (BARDEAU, 2009).

Oxydes	SiO ₂	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅
Température de fusion (°C)	1715	350	2521	2800	1565	1650	2040	563

– Caractérisation des principaux composés structuraux et potentiel de production de bioéthanol de deuxième génération

Le Tableau 3a (GODIN *et al.*, 2010) montre, au travers d'une revue de la littérature, les **variations** pouvant être observées au niveau **des teneurs moyennes en cellulose, hémicelluloses et lignine**, déterminées par la méthode de VAN SOEST *et al.* (1985), que ce soit au sein d'une même espèce ou, *a fortiori*, entre espèces, pour différentes sources de biomasse : espèces fourragères, ligneuses... Les premiers résultats obtenus dans le cadre d'essais phytotechniques menés principalement à Libramont entre 2007 et 2009 soulignent également cette diversité (Tableau 3b). Il faut cependant souligner les différences observées entre ces deux parties du tableau et l'importance de connaître les conditions de cultures pour aborder l'aspect qualitatif de ces productions.

Le **procédé de production de bioéthanol** comprend cinq étapes :

- le prétraitement de la biomasse lignocellulosique permet de libérer les polysaccharides structuraux (cellulose et hémicelluloses) des lignines qui les recouvrent (OGIER *et al.*, 1999 ; HENDRIKS et ZEEMAN, 2009) ;
- l'hydrolyse des polysaccharides structuraux (cellulose et hémicelluloses) en monosaccharides fermentescibles, par hydrolyse enzymatique (par des cellulases et des hémicellulases) ou à l'acide dilué (H₂SO₄) (OGIER *et al.*, 1999 ; HOUGHTON *et al.*, 2006) ;
- la neutralisation et la détoxification des inhibiteurs de fermentation (PALMQVIST et HAHN-HAGERDAL, 2000 ; HUANG *et al.*, 2008) ;
- la fermentation des hexoses (principalement le glucose) et/ou des pentoses (principalement le xylose et l'arabinose), issus des polysaccharides structuraux, en éthanol. Les rendements de fermentation des monosaccharides issus de polysaccharides structuraux peuvent être considérés comme étant de 92,5% pour la fermentation en éthanol du glucose et de 86% pour la fermentation en éthanol des autres monosaccharides (HAMELINCK *et al.*, 2005a) ;
- la concentration de l'éthanol produit (HUANG *et al.*, 2008 ; HENDRIKS et ZEEMAN, 2009).

TABEAU 3 – Principaux constituants chimiques et potentiel de production de bioéthanol de deuxième génération de diverses biomasses lignocellulosiques (adapté d'après GODIN *et al.*, 2010).

Biomasse lignocellulosique	Nombre de Valeurs	Composition chimique (% MS)			Potentiel de production de bioéthanol (l/100 kg MS)	PCS du bio- éthanol potentiellement produit (GJ/100 kg MS)
		Cellulose	Hémi- celluloses	Lignine		
a) Littérature scientifique (méthode de VAN SOEST)						
Bagasse de canne à sucre (<i>Saccharum officinarum</i> L.)	10	40,1 ± 6,7	26,3±6,3	17,9 ± 6,8	35,2 ± 6,0	0,82 ± 0,14
Fétuque élevée (<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.)	5	33,3 ± 2,7	30,4 ± 1,8	6,5 ± 2,2	32,8 ± 1,4	0,76 ± 0,03
Maïs fibre (<i>Zea mays</i> L.)	6	38,0 ± 3,8	27,4 ± 1,2	7,3 ± 1,6	34,3 ± 2,2	0,80 ± 0,05
Miscanthus (<i>Miscanthus</i> sp.)	4	44,0 ± 4,8	25,4 ± 2,2	20,4 ± 4,8	37,2 ± 3,2	0,87 ± 0,07
Paille d'avoine (<i>Avena sativa</i> L.)	5	35,5 ± 4,6	24,3 ± 6,5	13,7 ± 4,0	31,6 ± 3,3	0,73 ± 0,07
Paille de froment (<i>Triticum aestivum</i> L.)	27	36,6 ± 5,7	29,8 ± 7,7	16,9 ± 4,7	34,5 ± 4,6	0,80 ± 0,10
Paille de maïs grain (<i>Zea mays</i> L.)	12	37,3 ± 5,1	25,4 ± 4,3	15,8 ± 3,6	33,1 ± 4,0	0,77 ± 0,09
Paille d'orge (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	17	40,4 ± 7,8	25,6 ± 5,1	12,7 ± 3,6	36,3 ± 5,9	0,84 ± 0,13
Paille de riz (<i>Oryza sativa</i> L.)	32	35,3 ± 4,5	26,7 ± 4,9	9,8 ± 5,5	32,5 ± 2,6	0,75 ± 0,06
Paille de seigle (<i>Secale cereale</i> L.)	3	37,0 ± 3,0	28,9 ± 1,0	12,7 ± 9,6	34,4 ± 1,8	0,80 ± 0,04
Panic érigé (<i>Panicum virgatum</i> L.)	36	38,3 ± 3,8	31,2 ± 2,9	8,4 ± 3,9	36,1 ± 2,8	0,84 ± 0,06
Ray-grass italien (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	4	23,1 ± 4,8	18,7 ± 6,3	4,3 ± 2,4	21,7 ± 3,5	0,50 ± 0,08
Sorgho fibre (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench)	7	42,3 ± 2,6	26,2 ± 0,6	8,0 ± 0,4	36,4 ± 1,6	0,85 ± 0,03
Sorgho fourrager (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench)	18	28,3 ± 4,6	22,8 ± 3,6	8,7 ± 3,9	26,6 ± 2,7	0,62 ± 0,06
Chanvre (<i>Cannabis sativa</i> L.)	15	60,3 ± 6,2	16,8 ± 3,9	6,8 ± 3,4	44,8 ± 3,8	1,04 ± 0,08
Kenaf (<i>Hibiscus cannabinus</i> L.)	6	53,2 ± 4,1	18,4 ± 1,4	7,9 ± 1,2	41,3 ± 2,1	0,96 ± 0,04
Hêtre (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	3	45,4 ± 1,9	27,9 ± 6,8	23,1 ± 1,3	41,2 ± 2,1	0,96 ± 0,05
Peuplier (<i>Populus</i> sp.)	4	42,0 ± 2,9	22,0 ± 6,2	24,8 ± 3,8	36,2 ± 3,4	0,84 ± 0,07
Saule (<i>Salix</i> sp.)	2	46,5 ± 13,5	18,5 ± 6,4	20,0 ± 1,4	37,3 ± 3,5	0,87 ± 0,08
Douglas (<i>Pseudotsuga</i> sp.)	3	48,8 ± 7,6	21,1 ± 11,4	25,9 ± 2,2	40,0 ± 1,9	0,93 ± 0,04
Epicea (<i>Picea</i> sp.)	4	44,3 ± 4,2	26,1 ± 3,7	28,4 ± 0,7	39,7 ± 1,0	0,92 ± 0,02
b) Essais de Libramont (prétraitement de type thermohydrolyse)						
Miscanthus	9	48,4 ± 1,2	26,1±0,6	8,8±0,5	40,2±0,7	0,94±0,01
Panic érigé	7	40,1±1,7	30,3±0,9	7,2±0,3	36,8±1,4	0,86±0,03
Fétuque (<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.)	26	34,0±1,2	25,2±1,1	4,3±0,2	31,0±1,0	0,72±0,02
Sorgho fibre (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench)	16	29,7±1,0	25,1±2,3	3,2±0,5	28,4±1,0	0,66±0,02
Maïs fibre (<i>Zea mays</i> L.)	21	26,3±2,1	23,8±1,4	3,4±0,3	25,8±1,6	0,60±0,03
Dactyle-luzerne	9	27,0±1,0	12,9±1,1	4,3±0,2	22,3±0,9	0,52±0,02
Chanvre (<i>Cannabis sativa</i> L.)	15	47,5±3,5	6,4±1,6	8,0±1,0	31,9±2,3	0,74±0,05
Consoude	4	22,4±0,2	9,6±0,7	6,9±1,1	18,3±0,3	0,42±0,01

– La matière organique et le rapport C/N : optimum qualitatif et quantitatif du substrat pour la production de biogaz

Beaucoup de paramètres influent sur le procédé de biométhanisation, donc sur la quantité et la qualité du biogaz produit. Ces facteurs dépendent du produit utilisé, mais également de paramètres physico-chimiques de la fermentation (température, pH...) et technologiques (temps de rétention, charge...).

La biométhanisation est un procédé biologique complexe (AHRING, 2003a et 2003b) faisant intervenir quatre grands groupes de bactéries :

- les bactéries hydrolytiques réduisant la matière organique complexe en des molécules plus simples (monomères, dimères, acides aminés, acides organiques) ;
- les bactéries acidogènes transformant les molécules simples en acides gras volatils, CO₂, H₂ (hydrogène) et alcools ;
- les bactéries acétogènes productrices d'acide acétique ;
- enfin, les bactéries méthanogènes qui produisent du CH₄ et du CO₂ en clivant la molécule d'acide acétique (70% du méthane produit) ou qui réduisent le CO₂ en CH₄ à l'aide de l'hydrogène produit lors de l'acidogénèse (30% du CH₄ produit).

Le facteur de régulation principal de la production de CH₄ est l'hydrogène solubilisé nécessaire pour les bactéries hydrogénotrophes mais qui, en quantité excessive, inhibe les bactéries acétogènes. Dès lors, les acides gras volatils s'accumulent, le pH chute et inhibe à son tour les bactéries méthanogènes. L'art de la biométhanisation consiste donc à établir un apport quantitatif (taux d'alimentation) et qualitatif (vitesse de digestibilité, rapport carbone/azote, teneur en soufre) de substrats organiques optimisant la conversion de la biomasse en CH₄ dans le digesteur.

Une caractéristique importante de la biomasse réside dès lors dans sa **teneur en matières organiques** : plus cette dernière est élevée, plus la production de méthane sera importante, mais aussi dans la qualité des nutriments qui la composent. La production de méthane par kilogramme de matière organique dégradée varie en fonction des teneurs en protéine, glucide et lipide : 1 kg de protéine pure donnera 480 litres de CH₄, 1 kg de lipide pur donnera 1 000 litres de CH₄ et enfin 1 kg de glucide pur donnera 375 litres de CH₄ (Equation de BUSWELL et MUELLER, 1952). Cependant, il importe, tout comme pour la production de bioéthanol de deuxième génération, que cette matière organique soit accessible aux bactéries. La teneur en lignine réduit la production de biogaz en limitant la dégradation du substrat. Ainsi, l'augmentation de la teneur en fibres de l'herbe entre une récolte en juin et en février, passant de 23 à 55%, entraîne une diminution du rendement en méthane de 48% (PROCHNOW *et al.*, 2005). Enfin, le **rapport C/N** du substrat est important pour le bon déroulement du processus de biométhanisation. Un rapport compris **entre 25 et 32 est optimal** (AHRING BK. *et al.*, 2003b). Un ratio trop faible entraîne un risque d'accumulation de l'azote qui inhibe la fermentation. Au contraire, un rapport C/N élevé ne permettra pas la production de méthane.

4. Comparaison de la valeur énergétique finale des trois filières

- Combustion directe

La nature de la biomasse agricole a peu d'impact sur la valeur du PCS (Tableau 4), qui se situe entre 1,8 et 1,9 GJ/100 kg MS. Les premiers résultats obtenus dans le cadre du projet ENERBIOM confirment l'homogénéité du PCS des différentes plantes, compris entre 1,78 GJ/100 kg MS pour la fétuque élevée et 1,88 GJ/100 kg MS pour le miscanthus. A titre de comparaison, le PCS de plaquettes forestières varie de 1,8 à 2,1 GJ/100 kg MS.

TABLEAU 4 – Pouvoirs calorifiques de biomasses agricoles comparés à ceux du bois (méthode de la bombe calorimétrique ; PCS et PCI, pouvoirs calorifiques supérieurs et inférieurs, en GJ/100 kg MS ; source : LERMaB).

Cultures lignocellulosiques	Colza (déchets)	Tournesol (déchets)	Panic érigé	Miscanthus	Maïs (paille)	Maïs (déchets)	Maïs (rafle)	Froment (paille)	Epeautre	Fétuque	Sorgho	Bois (résineux)	Bois (feuillus)
PCS de combustion (GJ/100 kg MS)	1,79	2,16	1,89	1,88	1,80	1,84	1,87	1,87	1,88	1,79	1,91	1,97	1,87
PCI de combustion (GJ/100 kg MS)	1,65	2,01	1,76	1,75	1,67	1,70	1,73	1,74	1,74	1,66	1,78	1,83	1,73

- Transformation en bioéthanol de deuxième génération

Le Tableau 3 précédemment présenté illustre le potentiel théorique de production de bioéthanol de deuxième génération de différentes biomasses agricoles, en se basant sur leur composition chimique, c'est-à-dire en considérant que les rendements d'hydrolyse de la cellulose et des hémicelluloses en

monosaccharides fermentescibles et de fermentation de ces monosaccharides en éthanol sont égaux à 100%.

Sur la base des rendements observés pour les différentes cultures lignocellulosiques produites à Libramont (Tableau 3b), ou extrapolés de la littérature pour les autres étapes du procédé de production (CARPITA et MCCANN, 2000 ; HAMELINCK *et al.*, 2005 a; DA COSTA SOUSA *et al.*, 2009), nous pouvons déterminer le potentiel de production de bioéthanol de deuxième génération, par 100 kg de matière sèche ou par hectare, dans les conditions de moyenne montagne qui règnent sur ce site. **Les cultures lignocellulosiques présentant les meilleurs potentiels de production de bioéthanol** de deuxième génération, basé sur un prétraitement de type thermohydrolyse, **sont le miscanthus, le panic érigé (zone grande culture), la fétuque élevée, le sorgho fibre, le maïs fibre et le chanvre**. Cet avantage a une double origine : d'une part, la somme des teneurs en cellulose et en hémicelluloses est élevée et, d'autre part, le rendement de production de biomasse lignocellulosique à l'hectare engendre un potentiel de production de bioéthanol de deuxième génération favorable par rapport aux autres biomasses lignocellulosiques.

– Digestion en biogaz

Dans le cadre du projet de collaboration LUXCYCLE 2004-2006 (CRP-GL, CRP-Henri Tudor, IG-Lux et Université de Luxembourg), **les potentialités de production** de biomasse et de méthane **de divers systèmes de culture** ont été étudiées. Etant récoltées en vert et au pic de production de biomasse (stade laiteux), les céréales d'hiver retenues (triticale, épeautre, orge, avoine) peuvent être suivies par une culture d'été à cycle long (maïs ou sorgho) ou par une culture d'été à cycle plus court (chanvre ou tournesol). L'analyse du pouvoir méthanogène de la biomasse a été exécutée en séquence à l'aide de digesteurs de 2 litres en suivant la norme VDI 4630.

Les résultats en termes de production de biomasse et de mètre cube normalisé de CH₄ par hectare mis en culture (Nm³/ha) ou par tonne de matière sèche (Nm³/t MS) sont présentés dans le Tableau 5. Ce concept agronomique et « biologique » de **production bisannuelle de biomasse** génère en moyenne, annuellement, 5 600 Nm³/ha de CH₄ et est similaire pour les deux campagnes. **Le binôme orge-sorgho est a priori le plus productif** et permet la production de 6 000 à 7 000 Nm³/ha de CH₄ annuellement. En 2004-2005, la production hivernale de CH₄ était équivalente à la production estivale. En revanche, en 2005-2006, 70% de la production de CH₄ ont été obtenus à partir de la biomasse produite en hiver.

TABLEAU 5 – Productions annuelles moyennes de biomasse et de CH₄, et PCS de combustion de ce biogaz pour divers binômes de cultures au cours des saisons 2004-2005 et 2005-2006 à Noertzange (Luxembourg).

Productions		Année	Rendement (MS t/ha)			CH ₄ (Nm ³ /ha)			CH ₄ (Nm ³ /t MS)			PCS CH ₄ (GJ/100kgMS)		
Hiver	Été		Hiver	Été	Total	Hiver	Été	Total	Hiver	Été	Total	Hiver	Été	Total
Triticale	Tournesol	Moy.	12,4	8,0	20,4	3799	2048	5847	308	256	564	1,10	0,92	2,02
Orge	Sorgho	Moy.	10,3	10,8	21,1	3172	3361	6533	308	313	621	1,11	1,12	2,23
Epeautre	Chanvre	Moy.	11,8	7,9	19,7	3448	1685	5133	293	213	507	1,05	0,77	1,82
Triticale	Maïs	Moy.	9,7	7,6	17,3	2696	2140	4836	279	282	561	1,00	1,01	2,01
Avoine	-	2004-05	10,5	-	10,5	3864	-	3864	368	-	368	1,32	-	1,32

Par comparaison, le potentiel méthanogène de cultures similaires à celles étudiées dans le cadre du projet ENERBIOM sont de l'ordre de grandeur suivant : 390 Nm³/t MS pour un ensilage d'herbe (LEHTOMÄKI *et al.*, 2008), 377 Nm³/t MS pour un ensilage de miscanthus (E. SMEKENS, EAST S.A., communication personnelle) et 197 Nm³/t MS pour le topinambour (Glea, on-line).

5. Performances énergétiques et économiques et pertinences environnementale et sociétale des trois valorisations

– Performances énergétiques et économiques, et facteurs de variation

La filière énergétique de la biomasse lignocellulosique va de la production à partir des ressources naturelles et des outils de procédés de production, à la consommation du produit énergétique final. A

partir des résultats pré-cités et synthétisés dans le Tableau 6, nous pourrions déduire une valorisation bénéficiant d'un avantage énergétique par rapport à une autre. Dans notre cas, il semble largement préférable, énergétiquement, de brûler la biomasse, mais le calcul du rendement énergétique est complexe et demande de la rigueur et du recul.

TABLEAU 6 – Synthèse du PCS pour une même culture selon les trois voies de valorisation énergétique.

Culture lignocellulosique	PCS du potentiel de production de bioéthanol (GJ/100 kg MS)		PCS de combustion (GJ/100 kg MS)		PCS du potentiel de production de méthane (GJ/100 kg MS)	
Miscanthus	0,940 ± 0,016	(a)	1,933 ± 0,018	(a)	1,35	(d)
Panic érigé	0,861 ± 0,031	(a)	1,885 ± 0,007	(a)		
Fétuque élevée	0,726 ± 0,024	(a)	1,829 ± 0,020	(a)		
Sorgho fibre	0,664 ± 0,022	(a)	1,823 ± 0,033	(a)	1,085 ± 0,155	(c)
Maïs fibre	0,604 ± 0,037	(a)	1,843 ± 0,010	(a)	1,015 ± 0,065	(c)
Dactyle-luzerne	0,522 ± 0,022	(a)	1,882 ± 0,020	(a)		
Chanvre	0,747 ± 0,053	(a)	1,799 ± 0,012	(a)	0,765 ± 0,015	(c)

(a) : CRA-W ; (b) : LERMaB ; (c) : CRP-GL ; (d) : EAST S.A. ; (e) : AGRA Ost

Deux paramètres sont à prendre en compte dans la valorisation énergétique des fourrages : la quantité de matière sèche valorisable par hectare et la qualité du fourrage, c'est-à-dire sa propension à fournir de l'énergie par tonne de matière sèche. Ces deux paramètres sont eux-mêmes influencés par de nombreux facteurs agronomiques et technologiques.

C'est surtout le **type de biomasse** et les **itinéraires techniques**, dans le cas de biomasses agricoles, qui vont avoir un impact important sur la qualité de la matière première. En effet, le rendement énergétique dépend des propriétés chimiques (composés organiques et inorganiques), structurales (fibres, lignines...) et physiques (humidité, taille des particules, densité) de la biomasse. Cependant, comme nous l'avons vu, ces caractéristiques ne doivent pas être les mêmes d'une valorisation à l'autre.

Pour une espèce donnée, le **stade de végétation** est l'un des principaux facteurs affectant la composition et la structure. Si la plupart des éléments indésirables comme l'azote, le soufre, le potassium, le chlore diminuent significativement avec l'âge de la végétation, la teneur en lignine, elle, augmente. Si nous prenons l'exemple d'une prairie dite naturelle, les espèces prairiales semblent avoir peu d'influence sur la composition chimique de la biomasse produite, à un stade de maturité donné (PROCHNOW, 2009a)... Ce qui privilégierait **une gestion intensive avec plusieurs coupes d'ensilage pour le biogaz, un foin grossier pour la combustion et une situation intermédiaire pour la filière bioéthanol.**

La **saison de récolte** est tout aussi importante que le stade de végétation. Si une récolte hivernale modifie les caractéristiques de la culture telles que l'humidité ou la diminution de concentration des éléments indésirables par des phénomènes de lessivage ou de translocation, elle peut s'accompagner de pertes de matière sèche importantes. Des diminutions de rendement en matière sèche de près de 70% pour des prairies semi-naturelles et de 35% pour du miscanthus ont été mesurées (PROCHNOW, 2009a). Ces pertes et leurs conséquences sur la qualité intrinsèque de la biomasse pour une filière doivent dès lors être considérées pour chacune des cultures fourragères ou dédiées, afin de définir un optimum de gestion en fonction de la valorisation souhaitée et ce, sur la base du bilan énergétique et économique.

La récolte est un autre élément important du potentiel énergétique d'une culture. Pour les cultures fourragères, les **techniques de récolte**, ensilage ou/et fanage sont connues et aisées avec des machines agricoles conventionnelles (PROCHNOW, 2009b), ce qui n'est pas le cas pour certaines cultures dédiées telles que le chanvre. L'efficacité et le pourcentage de pertes peut s'en ressentir. Enfin, la faible densité énergétique de la biomasse lignocellulosique et sa dispersion pénalisent les coûts de collecte, de logistique et de transformation, ce qui handicape structurellement les filières de valorisation nécessitant de mobiliser de grandes quantités de matières premières (REIJNDERS et HUIJBREGTS, 2009).

Enfin, du point de vue technologique, deux aspects sont à considérer : la culture et le **procédé industriel de valorisation**. En effet, ce dernier doit pouvoir s'adapter aux caractéristiques de la matière première utilisée. Par exemple, dans le cas du bioéthanol, le prétraitement de la biomasse lignocellulosique permettant de libérer les polysaccharides structuraux des lignines qui les recouvrent a un impact important sur le rendement du procédé (HENDRIKS et ZEEMAN, 2009 ; Tableau 7).

TABEAU 7 – Effet du type de prétraitement sur le potentiel de production de bioéthanol de deuxième génération au départ du maïs fibre.

Type de prétraitement	H ₂ SO ₄	Thermo-	Ca(OH) ₂	Explosion à la vapeur catalysée par...		
	dilué	hydrolyse		NH ₃ de type AFEX	NH ₃ de type ARP	SO ₂
Bioéthanol (litres d'éthanol/t MS)	274,3 ±16,5	258,0 ±15,7	257,1 ±15,9	278,9 ±16,9	264,7 ±16,0	247,3 ±15,1

– Pertinences environnementale et sociétale

Outre les aspects énergétiques et économiques, ces productions doivent rester pertinentes vis-à-vis de l'environnement. Les bénéfices environnementaux varient en fonction du type, de la localisation et du mode de production de la biomasse (SMEETS et FAAIJ, 2009). D'une manière générale, les externalités environnementales liées à la phase de production de la biomasse sont les mêmes que pour une utilisation à des fins d'élevage ou énergétiques. Cependant, des différences vont apparaître si l'on considère l'ensemble de la chaîne « production - valorisation ». **L'Analyse de Cycle de Vie (ACV)**, de la production de la biomasse jusqu'à la consommation de l'énergie, est **un des outils d'évaluation permettant une telle comparaison inter-filières** et, dès lors, une prise de décision. La série des normes ISO 14040, parue à partir de 1997, décrit la méthodologie et la déontologie que doivent suivre les études ACV (MORAS, 2007).

Une récente étude de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie basée sur cette méthodologie (ADEME, 2009) conclut, d'une part, que **la production d'énergie à partir des cultures lignocellulosiques émet significativement moins de gaz à effet de serre** que la production d'énergie fossile et que, d'autre part, **les cultures pérennes présentent un impact environnemental plus faible que les annuelles**. Reste peut être que, pour estimer les impacts environnementaux de l'utilisation unique de la biomasse des prairies ou des cultures fourragères pour une production énergétique, le système de référence pourrait être l'élevage puisque c'est celui-là même qui est substitué.

Conclusions

La valorisation énergétique de la biomasse destinée préalablement aux productions agricoles est techniquement possible au travers de trois voies de valorisation que sont la combustion, la biométhanisation et la production de bioéthanol de deuxième génération. Pour les productions fourragères comme pour les cultures dédiées, les résultats semblent prometteurs et les barrières techniques, malgré des degrés divers, paraissent franchissables. Plusieurs points doivent cependant être soulignés et à tempérer.

Force est de constater que nous considérons ici une valorisation exclusive de ces productions. Cependant, **une valorisation mixte** comme une biométhanisation avec des co-produits agricoles ou même une co-combustion avec d'autres biomasses offrent d'autres perspectives en termes de solutions techniques ou environnementales. Par exemple, si la combustion des foin pose des problèmes d'adaptation technologique, une option serait de diminuer la proportion relative du combustible prairial en lui associant du bois, qui présente des concentrations moindres en éléments indésirables. Une autre possibilité serait la production de biogaz en se basant sur un mélange de productions fourragères avec des lisiers d'origine animale.

Un autre point concerne **l'aspect qualitatif de l'énergie produite**. Si la forme la plus efficace au niveau du bilan énergétique semble être la combustion, il faut considérer la manière de consommer l'énergie : mobilité, chauffage, ou service. Le bioéthanol, par exemple, mélangé partiellement (10%) à des carburants d'origine fossile, ne nécessite pas d'adaptation tant des véhicules que des structures de distribution. Cette forme d'énergie présente des avantages difficilement contestables pour la

période transitoire dans laquelle nous nous trouvons, face à d'autres modes énergétiques pour notre mobilité.

Pour que la production agricole de biomasse cellulosique soit significative, il convient notamment d'augmenter les quantités récoltées tout en pérennisant la production. Pérennisation que pourraient apporter des cultures spécifiques dédiées à la valorisation énergétique, telles que le miscanthus et le panic érigé, dont l'avenir énergétique semble prometteur. Malgré leur intérêt, le potentiel agronomique de ces deux espèces reste encore à définir pour chacun des contextes socio-économiques et pédoclimatiques des régions agricoles. Enfin, certaines cultures fourragères adaptées dans nos régions peuvent s'avérer intéressantes, comme le maïs, le sorgho et surtout les espèces prairiales.

Les principaux critères d'implantation ou non d'une espèce sont avant tout d'ordre agronomique, technique, économique et environnemental :

- l'adaptation pédoclimatique et le rendement en biomasse ;
- la qualité de cette biomasse et son intégration en regard de la valorisation énergétique ;
- la fréquence de récolte, le stockage et la disponibilité de la biomasse.

Les cultures énergétiques dédiées à l'énergie pourraient devenir ainsi **une alternative économique pour des exploitations agricoles en recherche de débouchés**. Les critères d'opportunité d'une implication de l'agriculteur dans ce domaine, et donc l'objet de notre questionnement, reposeront certainement à l'avenir sur les trois principaux points suivants :

- la rentabilité économique et l'identification d'un débouché ;
- la pertinence environnementale, mesurée par le type de conduite de la production ;
- la cohérence territoriale vis-à-vis de la surface agricole et des spéculations existantes.

Quelles que soient la production et les valorisations envisagées, la caractérisation structurelle et élémentaire de la biomasse étudiée pour une efficacité énergétique optimale, ainsi que sa pertinence économique et environnementale, sont indispensables pour envisager l'avenir technique et économique de cette forme de valorisation des fourrages. L'identification de scénarios, au travers du projet ENERBIOM, ajustés aux conditions locales permettra d'évaluer l'opportunité de la mise en place d'une filière « biomasse-énergie » sur la « Grande Région ».

Remerciements

Les auteurs remercient Thomas Schmit, Fabienne Rabier, Denis Mahin et Paul Dricot (CRA-W), Lucien Hoffmann et Sébastien Lemaigre (CRP-GL), Emmanuel Glaude (ASBL Au Pays de l'Attert), Yann Rogaume (LERMaB), Christelle Mignon (CRA-W Valbiom), pour leurs apports techniques et scientifiques, ainsi que les fonds européens FEDER et la Région Wallonne pour le financement des projets cités dans cet article.

Références bibliographiques

- ADEME (2009) : "Evaluation de la bibliographie relative aux ACV appliquées aux productions lignocellulosiques." *ADEME, Paris*, 41 p.
- AHRING BK. (2003a) : "Biomethanation I. Advances in biochemical engineering/biotechnology – vol. 81.", *Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York*. pp. 220
- AHRING BK. (2003b) : "Biomethanation I. Advances in biochemical engineering/biotechnology – vol. 82.", *Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York*. pp. 270
- BARDEAU G. (2009) "Etude de la faisabilité de produire des combustibles à partir de mélanges de coproduits agricoles", *rapport de master, ENSTIB*
- BIOBIB (2010): "A Database for biofuels" (pages consultée le 10 janvier 2010), [en ligne]. Adresse URL : <http://www.vt.tuwien.ac.at>
- BUSCH G. (2006) : "Future European agricultural landscapes. What can we learn from existing quantitative land use scenario studies?", *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114(1):121.
- CARPITA N., MCCANN M. (2000) : "The cell wall", In: Buchanan B., Gruissem W. & Jones R., eds. "Biochemistry and molecular biology of plants", *American Society of Plant Physiologists, Rockville*, 52-108.
- DA COSTA SOUSA L., CHUNDAWAT S., BALAN V., DALE B. (2009) : "Cradle-to-grave' assessment of existing lignocellulose pretreatment technologies", *Curr. Opinion in Biotechnology*, 20, 1-9.
- DEMIRBAS M.F., BALAT M., BALAT H. (2009) : "Potential contribution of biomass to the sustainable energy development", *Energy Conversion and Management*, 50:1746.
- DOOS BR, SHAW R. (1999) : "Can we predict the future food production? A sensitivity analysis.", *Global Environmental Change-Human And Policy Dimensions* 9(4):261-283.
- FAO (2004) : "Unified BioEnergy Terminology" *FAO Rome* 58 p.
- GODIN B., GHYSEL F., AGNEESSENS R., SCHMIT T., GOFFLOT S., LAMAUDIÈRE S., SINNAEVE G., GOFFART J.-P., GERIN P. A., STILMANT D., DELCARTE J. (2010) (soumis) : "Détermination de la cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et des cendres dans diverses cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de deuxième génération.", *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*
- HAMELINCK C., VAN HOOIJDONK G., FAAIJ A. (2005a) : "Ethanol from lignocellulosic biomass : techno-economic performance in short-, middle- and long-term.", *Biomass and Bioenergy*, 28, 384-410.
- HAMELINCK C., SUURS R, FAAIJ A (2005b) : "International bioenergy transport costs and energy balance.", *Biomass and Bioenergy* 29(2):114.
- HENDRIKS A., ZEEMAN G. (2009) : "Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass.", *Bioresource Technol.*, 100, 10-18.
- HOUGHTON J., WEATHERWAX S., FERRELL J. (2006) : "Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol : A Joint Research Agenda.", In: Houghton J., Weatherwax S. & Ferrell J., eds. "A Research Roadmap Resulting from the Biomass to Biofuels Workshop" 7-9 December 2005, Rockville.
- HUANG H.J., RAMASWAMY S., TSCHIRNER U., RAMARAO B. (2008) : "A review of separation technologies in current and future biorefineries.", *Separation and Purification Technol.*, 62, 1-21.
- LEHTOMÄKI A, HUTTUNEN S, LEHTINEN TM, RINTALA JA. (2008) : "Anaerobic digestion of grass silage in batch leach bed processes for methane production." *Bioresource Technology*, 99(8):3267.
- MCKENDRY P. (2002a) : "Energy production from biomass (part 1): conversion technologies", *Bioresource Technology* 83(1):47.
- MCKENDRY P. (2002b) : "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies", *Bioresource Technology* 83(1):47.
- MORAS S. (2007) : "Analyse comparée du cycle de vie des filières de production d'énergie renouvelable de la biomasse." *FUSAGx, Gembloux*. 332 p.
- OGIER J.-C., BALLERINI D., LEYGUE J.-P., RIGAL L., POURQUIE J. (1999) : "Production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique.", *Oil & Gas Sci. and Technol.*, 54(1), 67-94.
- PALMQVIST E., HAHN-HAGERDAL B. (2000) : "Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. I: inhibition and detoxification.", *Bioresource Technol.*, 74, 17-24.
- PROCHNOW A., HEIERMANN M., DRENCKHAN A., SCHELLE H. (2005) : "Season pattern of biomethanisation of grass from landscape management", *Agricultural Engineering International, Manuscript*
- PROCHNOW A, HEIERMANN M, PLÖCHL M, LINKE B, IDLER C, AMON T, HOBBS PJ. (2009a) : "Bioenergy from permanent grassland - A review: 1. Biogas." *Bioresource Technology* 100(21):4931.
- PROCHNOW A., HEIERMANN M., PLÖCHL M., AMON T., HOBBS PJ. (2009b) : "Bioenergy from permanent grassland - A review: 2." *Combustion. Bioresource Technology* 100(21):4945.
- REIJNDERS L, HUIJBREGTS MAJ. (2009). "Biofuels for Road Transport: A seed to wheel perspective." *Springer, London*.

- ROSSILO-CALLE F., DE GROOT P., HEMSTOCK SL., WOODS J. (2007) : “The Biomass Assessment Handbook”, *Earthscan, London*, 269.
- ROWE R. SN, TAYLOR G. (2009) : “Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK.”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 13:271-290.
- SCHENKEL Y., BENABDALLAH B (2005) : “Guide biomasse énergie” *IEPF, Québec*, 391 p.
- SMEETS E., FAAIJ A. (2009). "The economical and environmental performance of miscanthus and switchgrass production and supply chains in a European setting." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7):1230.
- SMEETS E., FAAIJ A., LEWANDOWSKI I., TURKENBURG W. (2007) : “A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050.”, *Progress in Energy and Combustion Science* 33(1):56.
- UNION EUROPEENNE (2003) : “Directive 2003/30/CE du parlement européen et du conseil du 8 mai 2003 visant à promouvoir l'utilisation de biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports.”, *Journal officiel de l'Union européenne*, L 123, 42-46.