

# FORÊT • NATURE

OUTILS POUR UNE GESTION  
RÉSILIENTE DES ESPACES NATURELS

## Tiré à part de la revue **Forêt.Nature**

La reproduction ou la mise en ligne totale ou partielle des textes  
et des illustrations est soumise à l'autorisation de la rédaction

[foretnature.be](http://foretnature.be)

**Rédaction** : Rue de la Plaine 9, B-6900 Marche. [info@foretnature.be](mailto:info@foretnature.be). T +32 (0)84 22 35 70

Abonnement à la revue Forêt.Nature :  
**librairie.foretnature.be**

---

Abonnez-vous gratuitement à Forêt.Mail et Forest.News :  
**foretnature.be**

Retrouvez les anciens articles de la revue  
et d'autres ressources : **foretnature.be**

## LA PRODUCTION DE BIOÉTHANOL À PARTIR DE BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

ISABELLE DIDDEREN – JACQUELINE DESTAIN – PHILIPPE THONART

*Le bioéthanol de seconde génération, produit à partir de biomasse lignocellulosique, semble promis à un bel avenir même si son essor se heurte encore à des difficultés technologiques. Nous proposons ici de présenter quelques aspects de la technique afin de mieux saisir l'importance de l'enjeu.*

**Depuis** quelques décennies, le monde doit faire face à une augmentation significative de sa demande en énergie. Mais, le recours accru aux énergies fossiles est confronté à différents problèmes : les ressources disponibles sont limitées, les pays consommateurs sont de plus en plus dépendant des pays producteurs, la consommation d'énergies fossiles engendre des émissions de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone. Ces gaz, produits en quantités devenues trop im-

portantes pour être régulées naturellement par les forêts et les océans, tendent à s'accumuler dans l'atmosphère et contribuent au réchauffement de la planète.

La recherche d'alternatives durables s'impose donc. Les énergies renouvelables (éolien, solaire, hydraulique, biomasse) constituent un ensemble de solutions puisqu'elles permettent de réduire la dépendance vis-à-vis du pétrole et la pollution de notre environnement.

Le secteur des transports, aujourd'hui totalement dépendant du pétrole, étudie plus particulièrement les potentialités de développement des biocarburants produits à partir de la biomasse végétale. Dans ce contexte et afin d'augmenter l'utilisation d'énergie renouvelable, la Commission européenne a élaboré une directive (Directive 2003/30/CE), fixant les normes d'intégration des biocarburants dans les carburants classiques, l'objectif étant d'atteindre 20 % de biocarburant en 2020 dont 5,75 % en 2010.

En Belgique, pays totalement importateur de carburants fossiles, la création d'une filière économique de production de bioéthanol pourrait être intéressante. Celle-ci permettrait, d'une part, la valorisation de certains produits agricoles dans un secteur non-alimentaire mais aussi d'autres produits ou co-produits végétaux et, d'autre part, la création d'emplois au niveau des sites de production ainsi qu'en amont et en aval de ceux-ci.

Le bioéthanol est le résultat de la bioconversion fermentaire de sucres par des micro-organismes, généralement des levures. Les matières premières végétales alcooligènes sont variées et peuvent être classées en trois catégories :

- les plantes saccharifères comme la betterave ;
- les plantes amylacées comme les céréales ;
- les plantes lignocellulosiques comme le bois, la paille mais aussi les déchets de l'industrie papetière...

Le bioéthanol produit à partir des deux premières filières est dit de première génération car les procédés de production sont maintenant bien maîtrisés. Celui

produit à partir de la lignocellulose est dit de seconde génération car sa production à l'échelle industrielle est plus difficile vu la complexité du substrat.

Cet article s'intéresse plus particulièrement au bioéthanol de seconde génération. Il résume les différents aspects fondamentaux, technologiques, économiques et environnementaux de la filière.

---

## LA LIGNOCELLULOSE

---

La biomasse lignocellulosique est une des principales ressources renouvelables présentes sur terre. Elle est composée essentiellement de trois polymères (la cellulose, l'hémicellulose et la lignine), dont les teneurs sont variables d'une espèce végétale à l'autre. À côté de ces trois éléments, d'autres sont présents dont les pectines<sup>5</sup>.

La cellulose est le polymère dont la concentration est la plus abondante (35 à 50 % de la biomasse). Plus de cinq cents résidus glucosyles liés entre eux par une liaison  $\beta$  1-4 forment ce polymère, lui conférant une structure linéaire.

Les molécules de cellulose, liées entre elles par des ponts hydrogènes, forment un plan. Cependant, des liaisons covalentes se forment également entre ces plans. Les arrangements entre les molécules de glucose peuvent être réalisés de différentes manières. Lorsque l'arrangement entre les molécules de glucose dans les deux plans est parfait, la région est dite cristalline. Par contre, lorsque les molécules sont disposées de manière irrégulière, la région est dite amorphe.

Des ponts hydrogènes se forment entre les résidus glucosyles dans une même molécule mais également entre molécules. Cet ensemble forme des micelles qui s'associent alors entre elles en microfibrilles, d'un diamètre de 3 à 10 µm et d'une longueur de quelques micromètres, formant une structure résistante, rigide et insoluble dans l'eau.

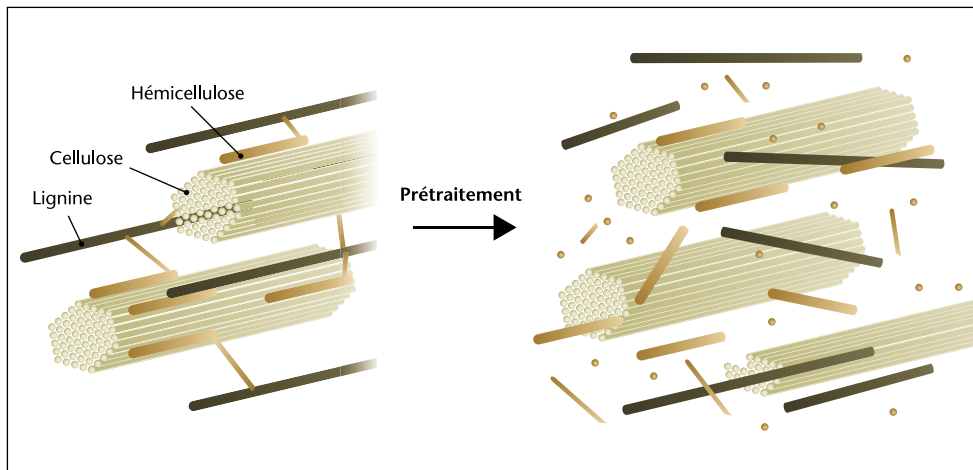
Le second composé présent en concentration importante (20 à 30 %) est l'hémicellulose. Sa composition est plus complexe que la cellulose. Sur le squelette formé de résidus glucose viennent se fixer de nombreuses ramifications de résidus de type pentose et hexose. Cette substance est présente entre les microfibrilles de cellulose et permet par ses ramifications, la liaison entre les molécules de cellulose et celles de pectine. Enfin, la lignine, troisième composant majeur de la biomasse (15 à 25 %), est un polymère insoluble composé d'unités phénylpropane.

La production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique est indirecte, elle nécessite obligatoirement des prétraitements physiques, chimiques ou physico-chimiques. Ceux-ci ont pour objectif de désolidariser la matrice lignocellulosique et de libérer la cellulose et l'hémicellulose du complexe formé avec la lignine (figure 1).

Le tableau 1 reprend les différents prétraitements possibles, leurs conditions de mise en œuvre et leur impact sur l'hydrolyse des deux polymères fermentescibles : la cellulose et l'hémicellulose.

Ces prétraitements permettent une hydrolyse complète ou presque complète des hémicelluloses en plus d'une déstructuration de la biomasse, mais ils ne permet-

Figure 1 – Impact du prétraitement sur la matière lignocellulosique.

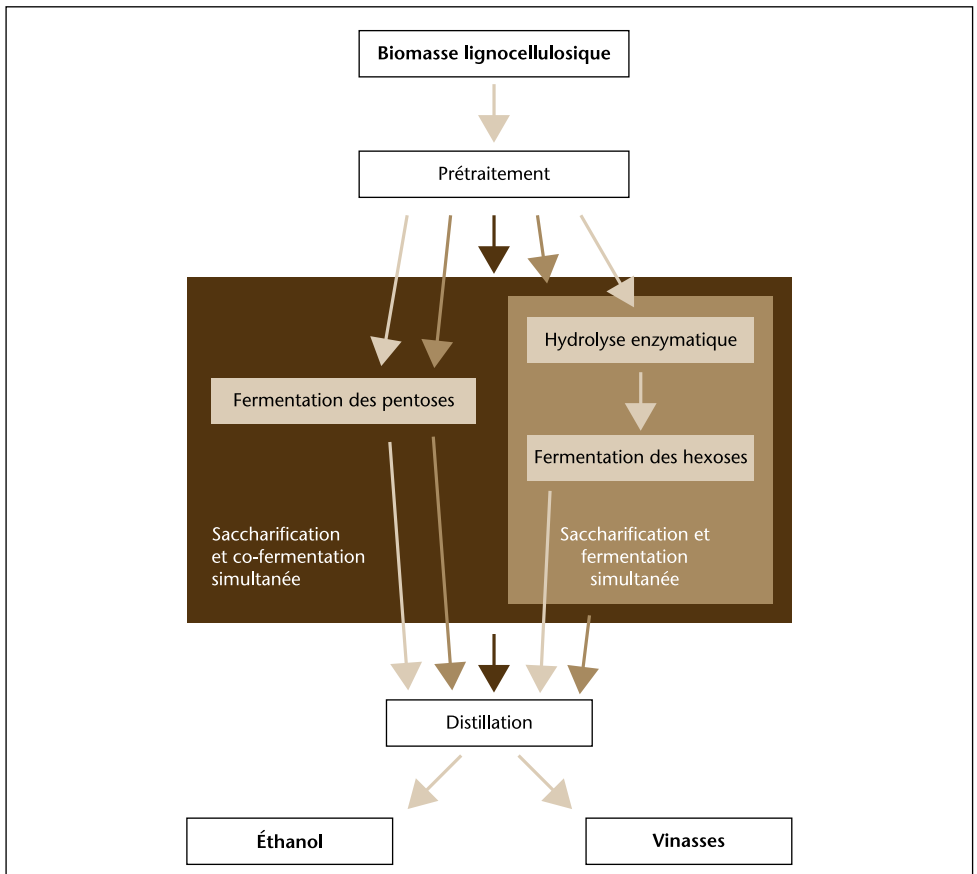


	Température (°C)	Pression (MPa)	Temps	Conversion hémicellulose	Conversion enzymatique*	Coût (€/kg)
Hydrolyse acide dilué	120 à 240	0,09	1 à 6 h	75 à 90 %	90 à 95 %	0,027
Hydrolyse acide concentré	40	4,14	10 sec. à 10 min.	85 à 90 %	90 à 95 %	-
Thermo-hydrolyse	190 à 250	> 4,93	1 à 20 min.	100 %	95 %	0,005
Explosion à la vapeur	160 à 290	0,68 à 4,93	10 sec. à 20 min.	30 à 50 %	90 à 100 %	0,062
Prétraitement alcalin	20 à 160	0,09	quelques jours	80 %	55 %	0,024

\* Effet du prétraitement sur la conversion de la cellulose en glucose par l'ajout ultérieur d'enzymes.

Tableau 1 – Comparaison des différents prétraitements de la lignocellulose.

Figure 2 – Schéma de production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique<sup>4</sup>.



tent qu'une hydrolyse partielle de la cellulose. Celle-ci est généralement réalisée par addition d'un complexe cellulolytique. Le jus ainsi hydrolysé est ensuite fermenté en conditions anaérobiques.

La levure *Saccharomyces cerevisiae*, traditionnellement utilisée pour la fermentation éthanolique, ne fermente que les hexoses (C6) et n'est pas apte à fermenter les pentoses (C5). C'est pourquoi, la plupart des installations industrielles actuelles ne sont pas capables de transformer tous les sucres issus de l'hydrolyse de la lignocellulose en éthanol. D'autres levures comme *Candida shehatae* ou *Pichia stipitis* fermentent les pentoses et pourront être développées à moyen terme, ce qui multipliera le rendement de bioconversion éthanol/matières premières par un facteur 1,4 à 1,5.

Après fermentation, l'éthanol est séparé du jus par distillation, rectification et déshydratation pour être utilisé comme biocarburant<sup>1</sup>. Un exemple des différentes étapes de bioconversion de la biomasse lignocellulosique en éthanol est présenté à la figure 2.

Le tableau 2 montre les rendements en éthanol attendus en fonction du type de fermentation pour différentes filières possibles en Région wallonne. Parmi les qua-

tre matières premières étudiées, l'épicéa donne de bons rendements car sa teneur en hexoses est élevée et comparable à celle de la paille.

---

## ASPECTS ÉCONOMIQUES

---

Le prix de revient du bioéthanol produit à partir de la biomasse lignocellulosique



Tableau 2 – Comparaison des rendements de production de bioéthanol (en litre par tonne de matière sèche) à partir de diverses matières premières suivant le procédé de production<sup>3</sup>.

Procédé	Matière première			
	Peuplier	Épicéa	Paille	Miscanthus
Fermentation : C6	311-329	386-415	258-272	235-247
Fermentations successives : C6 → C5	404-438	435-472	429-475	354-372
Fermentations simultanées : C6 et C5	397-432	425-464	427-469	337-367

doit être comparé à celui issu des filières de première génération. Ces filières sont déjà bien développées au stade industriel mais sont plus simples. Les sucres issus des plantes saccharifères sont, après extraction, directement disponibles pour les micro-organismes fermentaires. L'amidon des plantes amylacées doit être soumis avant fermentation à une hydrolyse enzymatique afin de libérer les hexoses. Pour ces filières de première génération, la matière première représente 40 à 70 % du prix de revient. Par contre, dans la filière de seconde génération, le coût de la matière première intervient dans une moindre mesure. Les deux facteurs les plus

coûteux du processus de bioconversion de la matière lignocellulosique sont le pré-traitement et l'hydrolyse enzymatique. Ils représentent, respectivement, environ 33 et 40 % du coût total. En 2050, le coût de production estimé de l'éthanol à partir de la biomasse lignocellulosique sera de 0,13 euro par litre.

## ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX

La production de bioéthanol présente des avantages et des inconvénients sur le plan environnemental. L'éthanol a un pouvoir calorifique de 21 285 kJ/kg, il est plus faible que celui de l'essence qui est de 32 020 kJ/kg. Il faudra donc en utiliser 33 % de plus pour maintenir les mêmes performances qu'un carburant fossile si il est utilisé seul<sup>2</sup>. Par contre, il possède un indice d'octane supérieur à de nombreux autres carburants, dont l'essence. Il apporte donc une meilleure résistance au cliquetis et permet d'améliorer les performances des moteurs.

Matière première	Prix (€/l)
Bois et co-produits forestiers	0,22
Co-produits agricoles	0,21
Froment	0,32
Betterave	0,35

Tableau 3 – Coût de production actuel du bioéthanol en fonction de la matière première.

Tableau 4 – Impacts de la combustion de bioéthanol par rapport à la combustion de l'essence sur la pollution ou l'effet de serre.

Paramètre ou rejet	Effet du bioéthanol
Gaz à effet de serre CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	Favorable
Monoxyde carbone	Favorable
Hydrocarbures gazeux	Favorable
Oxydes de soufre	Favorable
Particules	Sans effet
Hydrocarbures aromatiques	Favorable
Aldéhydes, cétones	Défavorable
Oxydes d'azote	Défavorable
Fumées	Sans effet
Biodégradabilité	Favorable
Pollution par les nitrates et les phytosanitaires	Défavorable



L'exploitation de biomasse lignocellulosique pour la production de bioéthanol présente des aspects environnementaux positifs sur la qualité des eaux (moins d'engrais), sur la qualité des sols (humus, érosion...). L'incorporation de bioéthanol dans l'essence permet globalement une diminution des rejets de nombreux composés polluants, comme le montre le tableau 4. En effet, la combustion de bioéthanol engendre moins de rejets de gaz à effet de serre, de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures gazeux que celle de l'essence.

---

## CONCLUSION

---

L'utilisation de matières premières sucrières ou amylacées pour la production de bioéthanol se heurte à un problème de disponibilité de ressources et de surfaces agricoles. De plus, leur utilisation pour la production de biocarburants entre en concurrence avec leur valorisation dans le secteur alimentaire. L'utilisation de la biomasse lignocellulosique pour la production de bioéthanol constitue une alternative. Mais elle doit s'intégrer dans un concept de valorisation totale du végétal, de bioraffinage en exploitant les co-produits (lignine...) et les sous-produits (effluents...). ■

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

- <sup>1</sup> ASTHER M., RECORD E., GIMBERT I., SIGOILLOT J.C., LEVASSEUR A., DANCHIN E.G.J., COUTINHO P.M., MONOT F. [2006]. Des champignons qui carburent : de l'étude du génome à la production industrielle. *Biofutur* 269 : 28-32.
- <sup>2</sup> BALLERINI D., ALAZARD-TOUX N. [2006]. *Les biocarburants. États des lieux, perspectives et*

*enjeux du développement*. 1<sup>ère</sup> édition. Éditions Technip, Paris, 348 p.

- <sup>3</sup> DIDDEREN I., DESTAIN J., THONART P. [2008]. *Le bioéthanol de seconde génération*. Éditions Les Presses Agronomiques, Gembloux, 128 p.
- <sup>4</sup> OGIER J.C., BALLERINI D., LEYGUE J.P., RIGAL L., POURQUIÉ J. [1999]. Production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique. *Oil Gas Sci. Technol.* 54(1) : 67-94.
- <sup>5</sup> THONART P. (1994). *La voie biologique*. In: BENABDALLAH B., CARRÉ J., KHENNAS S., VERGNET L. F., OSSOUKAI P. *Guide biomasse-énergie*. 1<sup>ère</sup> édition. Éditions Academia, Louvain-la-Neuve, pp. 136-143.

ISABELLE DIDDEREN

JACQUELINE DESTAIN

j.destain@ulg.ac.be

PHILIPPE THONART

Unité de Bio-industries,  
Gembloux Agro-Bio Tech, ULg  
Passage des Déportés, 2  
B-5030 Gembloux