



**HAL**  
open science

## Intérêt des ressources agricoles et forestières pour la bioénergie

Maryse Brancourt, Fabien Ferchaud, Herman Höfte, Jean-Charles Bastien, Gilles Pilate

► **To cite this version:**

Maryse Brancourt, Fabien Ferchaud, Herman Höfte, Jean-Charles Bastien, Gilles Pilate. Intérêt des ressources agricoles et forestières pour la bioénergie. *Innovations Agronomiques*, 2016, 54, pp.13-21. 10.15454/1.513772739642838E12 . hal-01608018

**HAL Id: hal-01608018**

**<https://hal.science/hal-01608018>**

Submitted on 28 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## Intérêt des ressources agricoles et forestières pour la bioénergie

Brancourt-Hulmel M.<sup>1</sup>, Ferchaud F.<sup>2</sup>, Hofte H.<sup>3</sup>, Bastien J.-C.<sup>4</sup>, Pilate G.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>INRA, UR 1158 AgrolImpact, site d'Estrées-Mons, F-80203 Péronne

<sup>2</sup>INRA, UR 1158 AgrolImpact, site de Laon, F-02000 Barenton-Bugny

<sup>3</sup>INRA, Institut Jean-Pierre Bourgin, UMR1318 INRA-AgroParisTech, F-78026 Versailles Cedex

<sup>4</sup>AGPF, INRA, F-45075 Orléans

Correspondance : herman.hofte@inra.fr

### Résumé

L'utilisation des ressources lignocellulosiques comme source d'énergie renouvelable devra concilier rendement important, faible empreinte environnementale et composition adaptée à l'utilisation énergétique (combustion, méthanisation, carburants « deuxième génération »). Cet article présente une revue des performances de plusieurs cultures agricoles et forestières pour la production durable de biomasse. Au niveau agronomique, différentes cultures sont comparées pour la production de biomasse, l'exportation d'azote et le ratio azote/carbone, mais aussi pour les réductions de gaz à effet de serre engendrées et le « coût » que cela représente. Enfin, la production d'éthanol par hectare est illustrée et des perspectives d'amélioration génétique pour la bioénergie sont évoquées. Au niveau forestier, la production de biomasse nécessite des plantations à fortes densité, telles que les cultures de taillis à courte rotation (TCR) ou à très courte rotation (TTCR) et la futaie à courte révolution (FCR). La génétique offre d'importantes marges de progrès pour l'optimisation des rendements en TCR. Concernant les FCR, les scénarios dits « semi-dédiés biomasse » sont les plus prometteurs. Ainsi, les graminées C4 pérennes (miscanthus, switchgrass) et les cultures forestières en TCR ou FCR, sont des ressources très complémentaires pour la production durable de biomasse à vocation énergétique et font l'objet, pour plusieurs d'entre elles, d'amélioration génétique à l'INRA.

**Mots-clés** : Biomasse, Cultures, Forêts, Bioénergie, Amélioration génétique

### Abstract : Dedicated bioenergy feedstocks from agriculture and forestry

Lignocellulosic feedstocks for renewable energy need to reconcile high yield, a limited environmental footprint and a composition adapted to the industrial procedures for the production of heat and electricity, methane or second-generation transport fuels. This article will review the performance of several dedicated feedstocks for sustainable biomass production. At the agronomic level, feedstocks are compared for their biomass yield, nitrogen export and nitrogen/carbon ratios as well as the reduction of greenhouse gas emissions and corresponding costs. In addition, the productivity of ethanol per ha is illustrated and perspectives for genetic improvement are discussed. Concerning forestry crops, short and very short rotation coppice and "stored coppice" systems are presented including the considerable scope for further genetic improvement and the development of semi-dedicated feedstock strategies. In conclusion, perennial C4 grasses (miscanthus, switchgrass) and trees under a short rotation coppice regime are complementary bioenergy feedstocks and are the object of genetic improvement programs in INRA laboratories.

**Keywords** : Bioenergy, Feedstocks, Short rotation coppice, Sustainability, Breeding

## Introduction

L'adoption de la biomasse comme source d'énergie renouvelable dépendra en grande partie de la disponibilité de ressources lignocellulosiques fiables et durables. Ces ressources peuvent être des déchets agricoles, forestiers ou municipaux ou des cultures dédiées. L'évaluation de la disponibilité de ces ressources pour un bassin de production est un problème complexe en raison de la compétition éventuelle avec d'autres usages alimentaires (« food vs fuel ») ou non-alimentaires (bois de construction, papier, fibres, paille pour l'élevage). Dans ce contexte, la production de biomasse peut potentiellement provoquer des changements dans l'utilisation des terres (Land Use Change, LUC) directs ou indirects (ILUC) et ainsi involontairement contribuer à soit la reforestation ou la déforestation et donc à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (Gabrielle *et al.*, 2014 ; Searchinger *et al.*, 2008). En fonction de la situation locale et en particulier la disponibilité des terres dites « marginales », les cultures dédiées peuvent plus ou moins contribuer à la production de biomasses énergétiques avec un bilan de GES positif. Ces terres marginales sont des terres inaptées à la production de cultures alimentaires comme des terres polluées ou difficilement accessibles, ainsi que des terres dans des zones écologiquement sensibles comme des terrains soumis à l'érosion ou dans des bassins de captage d'alimentation d'eau, où l'utilisation d'engrais et des produits sanitaires doit être fortement limitée. Dans ces conditions, les cultures énergétiques combinent favorablement la production d'énergie avec des fonctions écosystémiques (Gelfand *et al.*, 2013). Cet article présente une revue des performances de plusieurs cultures agricoles et forestières pour la production durable de biomasse. Ces cultures doivent répondre à un triple défi : un rendement important afin d'optimiser l'utilisation des terres, une faible empreinte environnementale et une composition adaptée à la finalité énergétique (combustion, méthanisation, carburants « deuxième génération »).

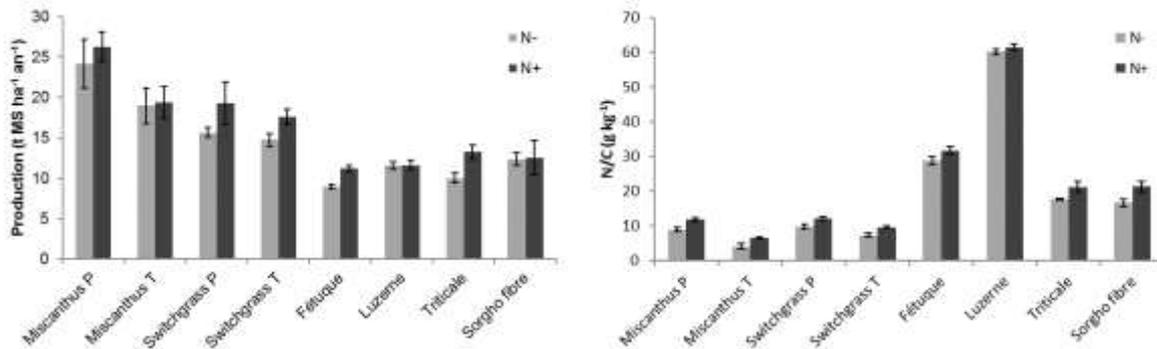
## 1. Les ressources agricoles

Concernant les ressources agricoles, le dispositif « Biomasse & Environnement » (B&E) de l'INRA AgrolImpact a permis de comparer la productivité de plusieurs cultures énergétiques sur le site d'Estrées-Mons (80) mais aussi d'étudier l'impact du mode de récolte des cultures pérennes et de la fertilisation azotée (Cadoux *et al.*, 2014).

Dans les conditions pédoclimatiques de la France septentrionale, le miscanthus (espèce *Miscanthus x giganteus*) et le switchgrass produisent en moyenne plus de biomasse à l'hectare que les autres espèces : fétuque, luzerne, sorgho fibre et triticales (Figure 1). En moyenne sur 4 années (2007-2010), les rendements en matière sèche (MS) les plus élevés sont atteints par le miscanthus en récolte automnale (dite précoce), avec 26 t MS ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. L'effet du mode de récolte est plus marqué pour le miscanthus, avec en moyenne une réduction de 24 % de la production en récolte de fin d'hiver (dite tardive), contre seulement 9 % pour le switchgrass. L'effet de la fertilisation azotée est par contre très peu marqué pour le miscanthus, même si le rendement sans azote apparaît légèrement plus faible pour la coupe précoce à partir de la quatrième année de production. Concernant les autres espèces étudiées, les résultats montrent une forte variabilité interannuelle des rendements pour la fétuque et la luzerne, liée en partie à des rendements plus faibles lors des années d'implantation. Enfin, contrairement à la fétuque et au triticales, nous n'avons pas observé d'effet de la fertilisation azotée sur le rendement du sorgho.

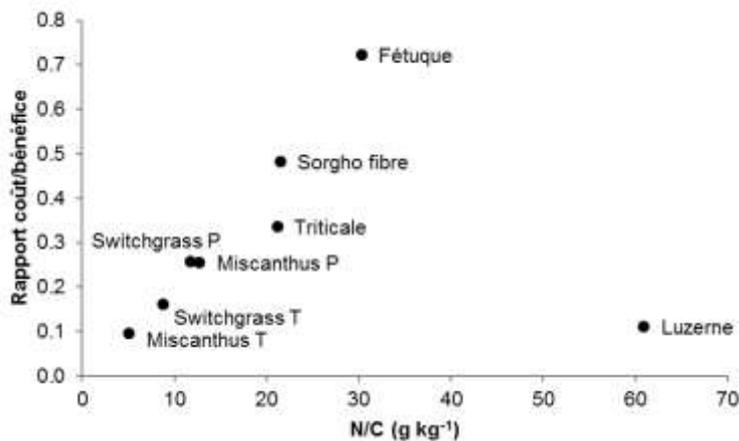
Les exportations de carbone et d'azote par les plantes ont également été quantifiées. Les résultats montrent des exportations d'azote très variables entre traitements. Elles sont très importantes pour la luzerne (jusqu'à 441 kg N ha<sup>-1</sup> en 2008), très faibles pour les cultures pérennes en coupe tardive sans azote (seulement 22 kg N ha<sup>-1</sup> en 2007 pour le miscanthus tardif N-) et intermédiaires pour les autres situations. Le ratio azote sur carbone (ratio N/C) de la biomasse récoltée est une composante importante des performances environnementales (Crutzen *et al.*, 2008), à l'exception de la luzerne qui

fixe l'azote de l'air. Le miscanthus et le switchgrass présentent les ratios N/C les plus faibles, surtout lorsqu'elles sont récoltées en fin d'hiver (Figure 1).

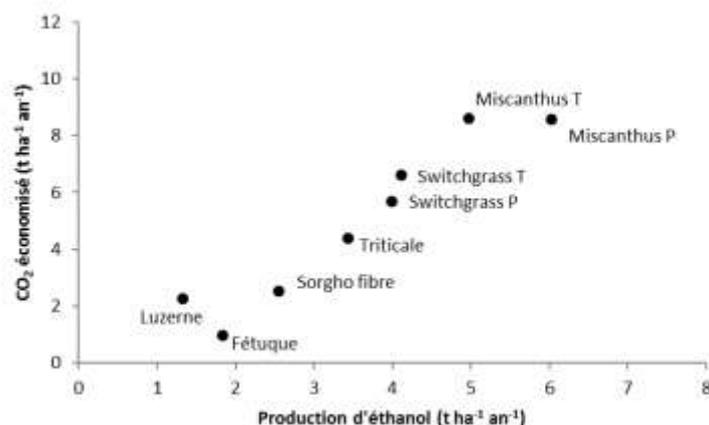


**Figure 1** : Production moyenne de biomasse sur la période 2007-2010 et ratio N/C de la biomasse exportée pour les différentes espèces et traitements étudiés sur le dispositif B&E ; P = récolte précoce et T = récolte tardive ; N- et N+ correspondent à deux niveaux de fertilisation azotée (d'après Cadoux *et al.*, 2014).

A partir de ces données expérimentales, et en adaptant l'approche « coût/bénéfice » de Crutzen *et al.* (2008), ont été comparées les émissions de gaz à effet de serre issus de la fertilisation par des engrais sur ces cultures énergétiques (coût) et les émissions évitées quand on utilise des biocarburants plutôt que des carburants fossiles (bénéfice). Le ratio coût/bénéfice varie de 0.10 pour le miscanthus en récolte tardive à 0.71 pour la fétuque; il est étroitement corrélé au ratio azote sur carbone de la biomasse récoltée, à l'exception de la luzerne (Figure 2). Les productions en éthanol ont été estimées, à partir des tonnages en matière sèche et d'un rendement théorique de conversion en éthanol, et varient de 1.3 ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour la luzerne à 6.1 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour le miscanthus en récolte d'automne. Le miscanthus, qui combine forte production d'éthanol à l'hectare et faible ratio N/C, permet de maximiser la quantité de gaz à effet de serre « économisée » par hectare (Figure 3).



**Figure 2** : Relation entre le rapport coût/bénéfice pour les émissions de gaz à effet de serre et le ratio N/C de la biomasse produite par les différentes espèces (d'après Cadoux *et al.*, 2014)



**Figure 3 :** Relation entre la quantité de CO<sub>2</sub> économisée par hectare et la production d'éthanol des différentes espèces (d'après Cadoux *et al.*, 2014)

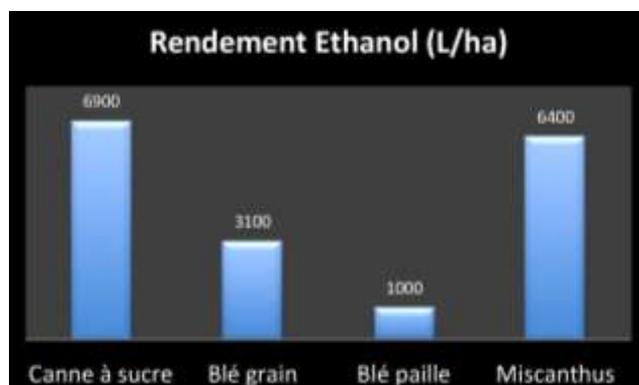
Au-delà de la comparaison des espèces, des travaux ont également porté sur la comparaison de différents génotypes de miscanthus pour la production d'éthanol. Nous avons cherché à comparer plusieurs clones de miscanthus à l'hybride interspécifique actuellement cultivé (GigB) pour leurs performances de production en éthanol (Arnoult 2014). Cinq clones ont été testés au sein du pilote construit dans le cadre du projet FUTUROL (et ont subi les premières étapes du procédé, à savoir, le prétraitement de la matière première et l'hydrolyse enzymatique. Nous avons mis en évidence que les cinq clones de miscanthus testés présentent des aptitudes différentes à la transformation en bioéthanol 2<sup>ème</sup> génération et que *M. x giganteus* n'est pas le plus optimal (Tableau 1). Au niveau du prétraitement et de l'hydrolyse enzymatique, les clones les plus productifs en biomasse par hectare (clone 1 et clone cultivé) présentent les moins bons résultats. A l'inverse, le clone 3, appartenant à l'espèce *M. sinensis*, présente le meilleur potentiel en éthanol. Il semble donc mieux adapté à ces deux étapes en comparaison aux clones les plus productifs en biomasse. Les deux autres clones sont intermédiaires. Si l'on prend en compte les rendements en biomasse à l'hectare, les tendances s'inversent pour le classement des clones : en raison de leurs forts rendements, les clones 1 et GigB présentent les meilleurs rendements en éthanol à l'hectare, contrairement au clone 3, qui présente alors le rendement le plus faible (Tableau 1). On met ainsi en évidence un antagonisme entre la productivité et la qualité pour le débouché en éthanol. Ces résultats montrent en outre qu'il existe une perspective de 20 % d'amélioration génétique du potentiel en éthanol.

**Tableau 1 :** Rendement de conversion en éthanol, production de biomasse par hectare et production

	Clone 1	GigB	Clone 2	Clone 3	Clone 4
Kg d'éthanol / tonne de biomasse	192	195	215	238	215
Tonnes de biomasse / ha (Estrées-Mons, 2014)	28.4	26.1	21.9	16.3	17
Tonnes d'éthanol /ha	5.5	5.1	4.7	3.9	3.7
Litres d'éthanol / ha	6909	6444	5970	4902	4636

Nous avons également comparé les performances du *M x giganteus* à celles de la canne à sucre, ainsi que du grain de blé et de la paille de blé, dans les conditions du site d'Estrées-Mons (Figure 4). Le rendement en éthanol de deuxième génération du miscanthus est comparable à celui pouvant être

obtenu à partir du saccharose de la canne à sucre (procédé et plante de 1<sup>ère</sup> génération), environ deux fois plus important que celui pouvant être issu de grain de blé (1<sup>ère</sup> génération) et sept fois supérieur à celui que nous pourrions obtenir à partir de paille de blé (2<sup>ème</sup> génération).



**Figure 4 :** Comparaison de la production en éthanol par hectare pour plusieurs cultures (D'après Arnoult *et al.*, 2014 et F. Martel, comm. pers.)

Enfin, *M x giganteus* étant pour l'instant le seul clone cultivé en France, cela risque de poser de problèmes phytosanitaires sur le plus long terme. Il est donc indispensable d'élargir les bases génétiques afin d'augmenter l'offre variétale et répondre de façon adaptée aux différents débouchés. Par ailleurs, la propagation clonale est onéreuse (environ 3000 €/ha) et par conséquent, un enjeu important est de développer des variétés multipliées par graine. Dans ce contexte, il sera important de limiter le pouvoir de dissémination de la plante d'une part en sélectionnant des génotypes avec des rhizomes non traçants, et d'autre part en produisant des graines hybrides triploïdes, issues d'un croisement entre une plante mère tétraploïde avec du pollen issu d'une plante diploïde.

## 2. Les ressources forestières

A l'heure actuelle, en France, la biomasse forestière destinée à la production d'énergie provient principalement de la récupération de résidus d'exploitation forestière et de déchets de l'industrie du bois. Dans le futur, des cultures dédiées à rotation courte ou très courte (entre 2 et 7 ans) pourraient venir en complément à ces sources de biomasse. Ces cultures de taillis à courte rotation (TCR) sont possibles avec des espèces à croissance rapide et ayant une bonne aptitude au rejet de souche : peuplier, saule, robinier, eucalyptus. La futaie à courte révolution (FCR) est une autre forme de culture d'arbres, dédiée à la production de biomasse à des fins énergétiques. Elle consiste à tirer parti de la croissance initiale exceptionnellement rapide de certains conifères (douglas, mélèze, sequoia, ...), qui atteignent en effet leur accroissement courant maximal entre 20 et 25 ans et sont de plus aptes à pousser sur des sols relativement peu favorables à la production agricole.

Tant pour les taillis à courte rotation que pour les futaies à courte révolution, le schéma idéal de conduite des plantations reste perfectible : il s'agit à la fois d'optimiser la production de biomasse à l'hectare et le maintien de la fertilité à long terme. La productivité des TCRs a été démontrée sur de bons sols agricoles (Spinelli, 2009), mais où ils sont en compétition avec des productions alimentaires. Une analyse de cycle de vie a démontré que ce système de production serait durable (Heller *et al.*, 2003) dès lors qu'un bon compromis soit établi entre rendement en biomasse et exportation de nutriments (Berthelot *et al.*, 2000). En effet, l'exportation de la totalité de la biomasse produite peut, dans les sols les plus sensibles, entraîner un appauvrissement du milieu et une baisse de la productivité. À grande échelle, la fertilisation n'est pas une solution économiquement et écologiquement souhaitable : le développement de ce type de cultures énergétiques ligneuses passe donc obligatoirement par des itinéraires techniques possédant un bon bilan environnemental.

Dans le cadre du projet Sylvabiom (projet ANR Bioénergies, 2008-2013), coordonné par JC Bastien, la pertinence de ces cultures énergétiques pour différentes espèces a été évaluée sur des sites contrastés (Bastien et al., 2013). Ce projet a impliqué l'INRA (unités AGPF et EEF), l'Université d'Orléans (LBLGC), l'institut technologique FCBA et l'IDF-CNPF. Les principaux résultats sont présentés ici.

### 2.1 Production et plasticité de l'utilisation de l'eau et de l'azote chez le peuplier cultivé en taillis à courte et très courte rotation.

Le TCR se plante à une densité élevée (de 1000 à 2000 tiges/ha), avec classiquement 3 rotations de 6 à 8 ans et une récolte nécessitant un matériel sylvicole (Figure 5). Le taillis à très courtes rotations (TTCR) est planté à une densité encore plus élevée (de 6000 à 15000 tiges/ha) avec 6 à 8 rotations de 2 à 4 ans. La récolte peut se réaliser avec un matériel agricole, tandis que le rapport écorce/bois est élevé.

Nous avons observé que des rendements de 9 à 11ts/ha/an étaient accessibles sur un site optimal pour le peuplier (site d'Echigey, Côte d'Or), ces rendements sont divisés par 2 ou plus quand les conditions pédoclimatiques sont beaucoup plus contraignantes (sites de Guéméné-Penfao en Bretagne et de Saint-Cyr en Val en Sologne).

Si les prédictions de production des TCR de peuplier sur site favorable apparaissent correctes, les productions des TTCR, sur les mêmes sites, sont décevantes et n'atteignent que 3 à 6 ts/ha.an. Cela peut être dû entre autre à une importante compétition herbacée, en début de rotation. Une sylviculture différente (croissance multibrin en première rotation, allongement de la durée de rotation) pourrait augmenter de façon importante ces rendements.



**Figure 5** : Taillis à courte rotation (à gauche) et à très courte rotation (à droite) du cultivar Dorskamp (*Populus deltoides* x *Populus nigra*) sur le site d'Echigey, favorable à la culture du peuplier.

L'effet de la densité de plantation sur la croissance et sur l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE, définie au niveau intrinsèque comme le rapport entre assimilation photosynthétique et conductance stomatique) est modulé par le contexte pédoclimatique. Lorsque les conditions sont favorables à la croissance (site d'Echigey), une augmentation de la densité de plantation entraîne une compétition accrue pour la lumière et par conséquent des arbres plus grands, de moindre diamètre, et une

efficience d'utilisation de l'eau réduite (due notamment à une diminution de l'assimilation photosynthétique en raison de l'ombrage). Lorsque les conditions sont moins favorables à la croissance en termes de fertilité et d'alimentation en eau (site de Saint-Cyr), une augmentation de la densité de plantation occasionne une compétition accrue pour l'eau et la lumière, source d'une réduction de la croissance secondaire (diamètre) mais pas primaire (hauteur), et d'une augmentation de l'efficience d'utilisation de l'eau (réduction de la conductance stomatique pour limiter les pertes en eau) (Toillon et al., 2013).

L'évaluation du comportement en TCR d'une cinquantaine de clones de peupliers montre qu'il existe d'importantes marges de progrès liées à la génétique pour optimiser les rendements de ce type de culture. Si certains clones sont performants à la fois en conditions favorables et limitantes, d'autres, présentant de piètres performances en conditions favorables, peuvent se révéler performants en conditions limitantes. Le saule, plus plastique que le peuplier, pourrait être plus intéressant en TCR sur sol marginaux, tandis que le robinier se révèle décevant dans ce type de culture du fait principalement de problèmes à l'installation. Enfin, l'épandage de boues résiduelles (de station d'épuration) apparaît bénéfique pour augmenter la production des TCR de saule en sol pauvre.

## *2.2 Potentiel de production de biomasse de conifères à croissance rapide cultivés en futaie à courte révolution*

Des parcelles expérimentales appartenant aux réseaux expérimentaux de l'INRA et du FCBA ont été choisies comme pouvant être assimilées à des plantations d'espèces ligneuses destinées à des fins de production de biomasse. Des échantillons d'arbres ont été abattus sur ces parcelles afin de construire des tarifs de volume et de biomasse compartimentés (bois, écorce, tronc, cime et branches) qui ont permis d'estimer la production de biomasse à l'échelle de la parcelle entière (Figure 6). Les différentes espèces évaluées (Douglas, Sapin de Vancouver, Sequoia sempervirens, Cryptomère du Japon, Cyprès de Leyland, Epicéa de Sitka, Mélèze hybride) présentent des répartitions de biomasse contrastées : le séquoia a une proportion importante d'écorce, le cryptomère en aiguilles tandis que 75% de la biomasse du Sapin de Vancouver se concentre dans le tronc. Des tarifs de biomasse précis ont pu être construits à partir des mesures du diamètre de tronc à 1m30 (DBH) : ainsi pour le douglas, des régressions non linéaires ont permis d'estimer de façon précise la biomasse totale à partir du DBH pour deux sites différents avec un coefficient de détermination proche de 0,9.



**Figure 6** : Récolte de Sapin de Vancouver sur le site de Chaud

Des productions très significatives de biomasse peuvent être espérées par une sélection judicieuse d'espèces forestières à croissance rapide conduites en futaie à courte révolution sur des stations peu propices aux cultures agricoles. En effet, dans une station adaptée à l'espèce, il est tout à fait envisageable d'atteindre autour de 25 ans une production totale de biomasse (produits d'éclaircies inclus) comprise entre 7 et 10 t de matière sèche/ha.an.

Le choix de l'espèce est certainement un facteur essentiel pour maximiser la production de biomasse. Les espèces présentant le plus fort potentiel de production de biomasse sont le Sapin de Vancouver, le Cyprès de Leyland, l'Épicéa de Sitka, et le Mélèze hybride. *A contrario*, le comportement du Douglas est assez décevant. D'importants gains de productivité sur la biomasse peuvent également être espérés par sélection génétique : ainsi dans une plantation clonale d'épicéa de Sitka, les mesures de productivité révèlent une forte variabilité (jusqu'à 12x) entre clones extrêmes pour la biomasse des arbres à 30 ans. Ces gains sont cependant à moduler si on prend en compte l'éventuelle nécessité de faire des compromis de sélection avec d'autres caractères.

La production de biomasse est également fortement affectée par la densité du peuplement : une production optimale nécessite une densité de plantations bien supérieure à ce qui se fait classiquement. Une sylviculture dédiée à la production de biomasse devra en effet envisager des densités de plantation de l'ordre de 1600 à 1800 tiges par ha.

Pour le moment, il n'est pas culturellement, ni économiquement envisagé de créer des futaies à courte révolution totalement dédiées à la production de biomasse. Cependant des scénarios dits "semi-dédiés biomasse" sont sérieusement envisagés : dans de tels scénarios, une éclaircie de la moitié des tiges est réalisée à 25 ans avec une vocation biomasse énergie, tandis que le reste des arbres est récoltés à 40-50 ans pour une utilisation en bois d'œuvre.

Il reste toutefois à renseigner 3 inconnues majeures. La première inconnue concerne la durabilité des FCR avec la très probable nécessité de recourir à la fertilisation. La seconde inconnue porte sur la rentabilité économique du système qui pourrait nécessiter un prix du bois plus élevé. La troisième inconnue concerne l'acceptabilité sociale et industrielle de ces itinéraires sylvicoles éloignés des itinéraires classiques. Des réponses à moyen terme devrait être obtenues dans le cadre du projet FUTUROL / ICIF (ONF) (Berthelot et al., 2014).

## Conclusions

Les graminées C4 pérennes (miscanthus, switchgrass) et les cultures forestières en TCR ou FCR, sont des ressources très complémentaires pour la production durable de biomasse à vocation énergétique. Le miscanthus et le switchgrass font partie des ressources agricoles les plus performantes en terme de rendement élevé et de faible empreinte environnementale. Des programmes d'amélioration de ces cultures sont en cours à plusieurs endroits dans le monde y compris à l'INRA. Ces programmes visent la diversification des bases génétiques, l'augmentation du rendement, la multiplication par graine, la maintenance d'une faible empreinte environnementale et l'amélioration de la qualité adaptée aux processus de transformation de la biomasse.

La production de biomasse forestière à vocation énergétique en TCR ou en FCR présente de réelles opportunités. Les TCR de peupliers ou de saules sur sols marginaux présentent bien sûr des productivités moindres que sur des sols agricoles mais des gains substantiels par sélection génétique comme par l'optimisation des conditions de cultures peuvent être raisonnablement espérés. Les FCR représentent également des solutions extrêmement prometteuses pour la production de biomasse à vocation énergétique sur des sols impropres aux cultures agricoles tout en maintenant un bilan environnemental acceptable. Enfin, l'application d'effluents organiques résiduels pour enrichir les sols en matière organique peuvent également concourir à la rentabilité des cultures forestières énergétiques (de Morogue et al., 2011).

## Références bibliographiques

- Arnoult S., 2014. Contribution à la définition d'idéotypes de miscanthus valorisables pour la production d'éthanol de 2ème génération et perspectives de sélection. Thèse de doctorat USTL Lille. 280 p.
- Bastien J.-C., Berthelot A., Brignolas F., Marron N., Maury S., Bodineau G., Gauvin J., Toillon J., Dallé E., Delaunay A., Le Jan I., Charnet F., Maine P., Merzeau D., 2015. Augmenter le niveau de production de biomasse des cultures ligneuses dédiées ou semi-dédiées. Principaux enseignements du projet SYLVABIOM, Rev. For. Fr. LXVII, 249-262
- Berthelot A., Bouvet A., Richter C., Gibaud G., 2014. Potentialités de production de biomasse de quelques essences résineuses en conditions forestières : Douglas, Épicéa commun, Épicéa de Sitka, Cyprès de Leyland, Séquoia toujours vert, Cryptomère du Japon, Pin maritime, Rev. For. Fr. LXVI, 695-713
- Berthelot A., Ranger J., Gelhaye D., 2000. Nutrient uptake and immobilization in a short-rotation coppice stand of hybrid poplars in north-west France, Forest Ecology and Management 128, 167-179
- Cadoux S., Ferchaud F., Demay C., Boizard H., Machet J.-M., Fourdinier E., Preudhomme M., Chabbert B., Gosse G., Mary B., 2014. Implications of productivity and nutrient requirements on greenhouse gas balance of annual and perennial bioenergy crops. Global Change Biology Bioenergy, 6, 425-438
- Crutzen P.J., Mosier A.R., Smith K.A., Winiwarter W., 2008. N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. Atmospheric Chemistry and Physics 8, 389-395.
- de Morogues F., Nguyen The N., Berthelot A., Melun F., 1998. Réflexions sur la rentabilité des taillis à courte et à très courte rotation d'Eucalyptus et de Peuplier, Rev. For. Fr. LXIII, 705-721
- Gabrielle B., Gagnaire N., Massad R.S., Dufosse K., Bessou C., 2014. Environmental assessment of biofuel pathways in Ile de France based on ecosystem modeling. Bioresour Technol, 152, 511-518.
- Gelfand I., Sahajpal R., Zhang X., Izaurralde R.C., Gross K.L., Robertson G.P., 2013. Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. Nature, 493, 514-517.
- Heller M., Keoleian G., Volk T., 2003. Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. Biomass and Bioenergy 25 (2) 147-65
- Searchinger T., Heimlich R., Houghton R.A., Dong F., Elobeid A., Fabiosa J., Tokgoz S., Hayes D., Yu T.H., 2008. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. Science, 319, 1238-1240.
- Spinell R., Nati C., Magagnotti N., 2009. Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. Biomass and Bioenergy 33, 817-821.
- Toillon J., Fichot R., Dalle E., Berthelot A., Brignolas F., Marron N., 2013. Planting density affects growth and water-use efficiency depending on site in *P. deltoides* x *P. nigra*. Forest Ecology and Management, 304, 345-354

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL ou son DOI)