

# QUALITÉ BIOÉNERGÉTIQUE DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE EN VUE DE LA PRODUCTION DE BIOCARBURANTS DE DEUXIÈME GÉNÉRATION

---

DENILSON DA SILVA PEREZ – ALAIN BERTHELOT – NICOLAS N’GUYEN THE  
AUDREY GUILLEMAIN – FRANCIS DE MOROGUES – MICHEL PETIT-CONIL

---

La recherche de produits de remplacement aux dérivés du pétrole apparaît aujourd’hui comme un impératif incontournable. Malgré des controverses au sein des filières pétrochimiques au sujet des estimations des réserves actuelles de pétrole, un consensus se dégage sur un chiffre de 1 000 à 1 200 milliards de barils en réserve, ce qui correspond à environ 150 milliards de tonnes et à 40 ans de production au rythme actuel d’exploitation. D’autre part, le secteur des transports est l’un des plus gros émetteurs de gaz à effet de serre (27 % des émissions nationales) et il dépend à plus de 98 % des carburants d’origine fossile (Biofuels Research Advisory Council, 2006). Dans un contexte où le développement durable a une priorité croissante, la biomasse végétale est le premier candidat au remplacement du pétrole, étant donné son abondance, supérieure aux réserves pétrolières (260 milliards de tonnes), et surtout de par son caractère renouvelable. Bien mené, le développement des filières de biocarburants doit permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cet avantage est principalement lié à la captation de CO<sub>2</sub> atmosphérique par les plantes et à un besoin moindre d’énergie non renouvelable pour produire les biocarburants que les carburants classiques.

La production actuelle de biocarburants liquides en Europe (EU 25) est d’environ 2 millions de tonnes, ce qui représente moins de 1 % de la consommation des carburants pour le marché des transports. Ces biocarburants sont dits de « première génération », il s’agit du bioéthanol produit directement par fermentation du jus de betterave ou à partir des sucres obtenus par hydrolyse de l’amidon (Yong *et al.*, 2006), et du biodiesel, extrait à partir de différentes plantes oléagineuses avec, si besoin est, quelques étapes de transformation chimique (Casanave *et al.*, 2007).

Cependant, si ces biocarburants présentent des avantages environnementaux évidents, le développement pérenne de ces nouvelles filières se heurte également à certains inconvénients qui ne doivent pas être négligés. Les rendements à l’hectare des principales filières des biocarburants dits de première génération sont relativement faibles : de 1 à 4 tonnes équivalent pétrole (tep) par hectare en fonction du biocarburant produit et des différentes filières agricoles impliquées. Les bilans énergétiques et environnementaux de ces biocarburants sont objets de controverse au sein de la communauté technico-scientifique. Cela combiné à la médiatisation des premiers constats des effets de la production de biocarburants de première génération sur les filières à vocation alimentaire a fait émerger les filières dites de deuxième génération : le bioéthanol produit à partir de cellulose et les carburants liquides ou gazeux de synthèse produits à partir de la gazéification de la biomasse.

Cette deuxième génération apparaît comme une alternative intéressante pour augmenter le rendement par hectare ainsi que pour élargir l'éventail des types de biomasse pouvant être utilisés (Evans, 2008). Dans ces cas, le bioéthanol est obtenu à partir de l'hydrolyse de la fraction « polysaccharides » de la matière végétale suivie de la fermentation des monosaccharides obtenus, en particulier les hexoses (Kumar *et al.*, 2009 ; Virkajärvi *et al.*, 2009). Le biodiesel peut être obtenu à partir d'un gaz de synthèse produit par la gazéification de la biomasse suivie d'une étape de conversion en carburants liquides par la méthode Fischer-Tropsch, dont le principe est connu et exploité depuis 1923 (Tijmensen *et al.*, 2002).

Néanmoins, les ressources en biomasse étant limitées, il est nécessaire d'éviter non seulement la compétition avec la production agricole à vocation alimentaire mais aussi la déstabilisation des filières agro-forestières déjà en place. Les futurs enjeux quant à la biomasse sont donc de tirer le meilleur profit du potentiel existant, par l'utilisation de ressources peu valorisées pour l'instant, et de nouvelles cultures dédiées [taillis à courte rotation (TCR) et taillis à très courte rotation (TTCR), plantes herbacées...].

Dans cet article, l'adéquation entre les cahiers des charges des procédés de fabrication de bio-carburants de deuxième génération par les voies biochimique et thermochimique et la qualité de la biomasse agro-forestière est examinée. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet PNRB REGIX<sup>(1)</sup> dans lequel des acteurs des procédés et des ressources en biomasse ont été amenés à travailler ensemble afin d'évaluer l'adéquation de différents types de biomasse agricole et forestière aux spécifications des procédés. Un aperçu de cette approche est donné pour quatre classes de biomasse forestière : TTCR, TCR, plaquettes forestières de feuillus et plaquettes forestières de résineux. Des résultats plus complets peuvent être obtenus dans d'autres publications parues récemment ou en préparation à l'heure actuelle (Da Silva Perez *et al.*, 2010a et 2010b ; Dupont *et al.*, 2010 ; Labalette *et al.*, 2010).

TABLEAU I **Caractéristiques des quatre classes de biomasse forestière étudiées**

Classe	Essences	Âge (années)	Caractéristiques	Fractions analysées	Nombre d'échantillons
TTCR . . . . .	Eucalyptus, Peuplier, Robinier, Saule	1-5	TTCR implantés dans le cadre du projet REGIX	Tige entière, bois, écorce, brindilles	53
TCR . . . . .	Eucalyptus, Peuplier, Robinier	11-13	TCR de 1 <sup>er</sup> ou 2 <sup>e</sup> rotation	Tige entière, bois, écorce, houppier, tronc	20
Plaquettes forestières de feuillus . . . . .	Chêne, Châtaignier, Charme, Hêtre, Tilleul, feuillus mélangés	Divers, dont certains inconnus	Coupe rase Éclaircies Rémanents	Plaquettes	26
Plaquettes forestières de résineux . . . . .	Pin (divers), Douglas, Épicéa, résineux mélangés	Divers, dont certains inconnus	Coupe rase Dépressage Éclaircies Rémanents Coupe jardinatoire	Plaquettes	19

(1) Le projet REGIX a été financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR) dans le cadre du programme national de recherche sur les bioénergies (PNRB) piloté par l'Agence nationale de la maîtrise de l'énergie (ADEME).

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### Le matériel végétal

Le principal objectif était de caractériser les espèces présentes dans le réseau REGIX quant à leur composition physico-chimique en se fondant sur des échantillons documentés et provenant de situations diversifiées.

Au total, 118 échantillons forestiers ont été analysés en deux campagnes (2007-2008 et 2008-2009) dont 73 étaient issus de TCR et TCCR de Peuplier, d'Eucalyptus, de Robinier et de Saule et 45 de plaquettes forestières de différentes espèces résineuses et feuillues (tableau I, p. 136).

Les prélèvements de biomasse ont été réalisés lors des évaluations de productivité nécessaires au projet REGIX. La plupart du temps, les échantillons ont été fournis sous forme de plaquettes. Un séchage de 96 h à 65 °C a été réalisé avant le broyage pour les analyses. Un broyage à 0,5 mm a été effectué pour les analyses chimiques et un deuxième broyage à 0,2 mm a été effectué pour les analyses élémentaires, la teneur en cendres et le pouvoir calorifique.

TABLEAU II **Méthodes analytiques utilisées pour la caractérisation de la biomasse forestière**

Paramètres analysés	Norme utilisée	Définition
Matière sèche résiduelle (MSR) . . . . .	XP CEN/TS 14774-1	Biocombustibles solides - Méthode de détermination de la teneur en humidité - Méthode par séchage à l'étuve - Partie 1 : humidité totale - Méthode de référence
Préparation échantillon . . . . .	XP CEN/TS 14780	Biocombustibles solides - Méthodes de préparation d'échantillon
Teneur en carbone (C) . . . . .	XP CEN/TS 15104	Biocombustibles solides - Détermination de la teneur totale en carbone, hydrogène et azote - Méthodes instrumentales
Teneur en hydrogène (H) . . . . .	XP CEN/TS 15104	Biocombustibles solides - Détermination de la teneur totale en carbone, hydrogène et azote - Méthodes instrumentales
Teneur en azote (N) . . . . .	NF V 18-120	Dosage de l'azote - Méthode par combustion (DUMAS)
Teneur en soufre (S) . . . . .	XP CEN/TS 15289	Biocombustibles solides - Détermination de la teneur totale en soufre et en chlore
Teneur en chlore (Cl) . . . . .	XP CEN/TS 15289	Biocombustibles solides - Détermination de la teneur totale en soufre et en chlore
Teneur en lignine . . . . .	Normes TAPPI T222 om-88	Lignine Klason
Teneurs en monosaccharides . . . . .	Normes TAPPI T2490m-85 (hydrolyse) et ASTM E1758 (analyse de sucres)	Reconstitution des teneurs en polysaccharides (cellulose et hémicelluloses) à partir des sucres monomères obtenus par double hydrolyse acide
Teneur en extractibles . . . . .	Protocole interne FCBA	Dosage de la fraction extractible par une séquence acétone-eau en utilisant un extracteur ASE (accelerated solvent extraction)

## Méthodes analytiques

Les méthodes utilisées pour les différentes analyses effectuées sont listées dans le tableau II (p. 137).

## RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### Évaluation de la qualité de la biomasse vis-à-vis des procédés thermochimiques

Les paramètres les plus importants pour la voie thermochimique sont la composition élémentaire en carbone, hydrogène, oxygène, azote, soufre et chlore, et la teneur et la composition des cendres. Le tableau III compile les spécifications de la qualité élémentaire de la biomasse fournies par les acteurs « procédés » du projet REGIX. Les valeurs moyennes obtenues pour ces différents éléments sont montrées dans la figure 1 (p. 139) pour les quatre classes de biomasse forestière étudiées.

TABLEAU III **Spécifications (en proportion de la masse de matière sèche, MS)  
 des matières premières pour certains procédés thermochimiques**  
 (Sources : Partenaires REGIX)

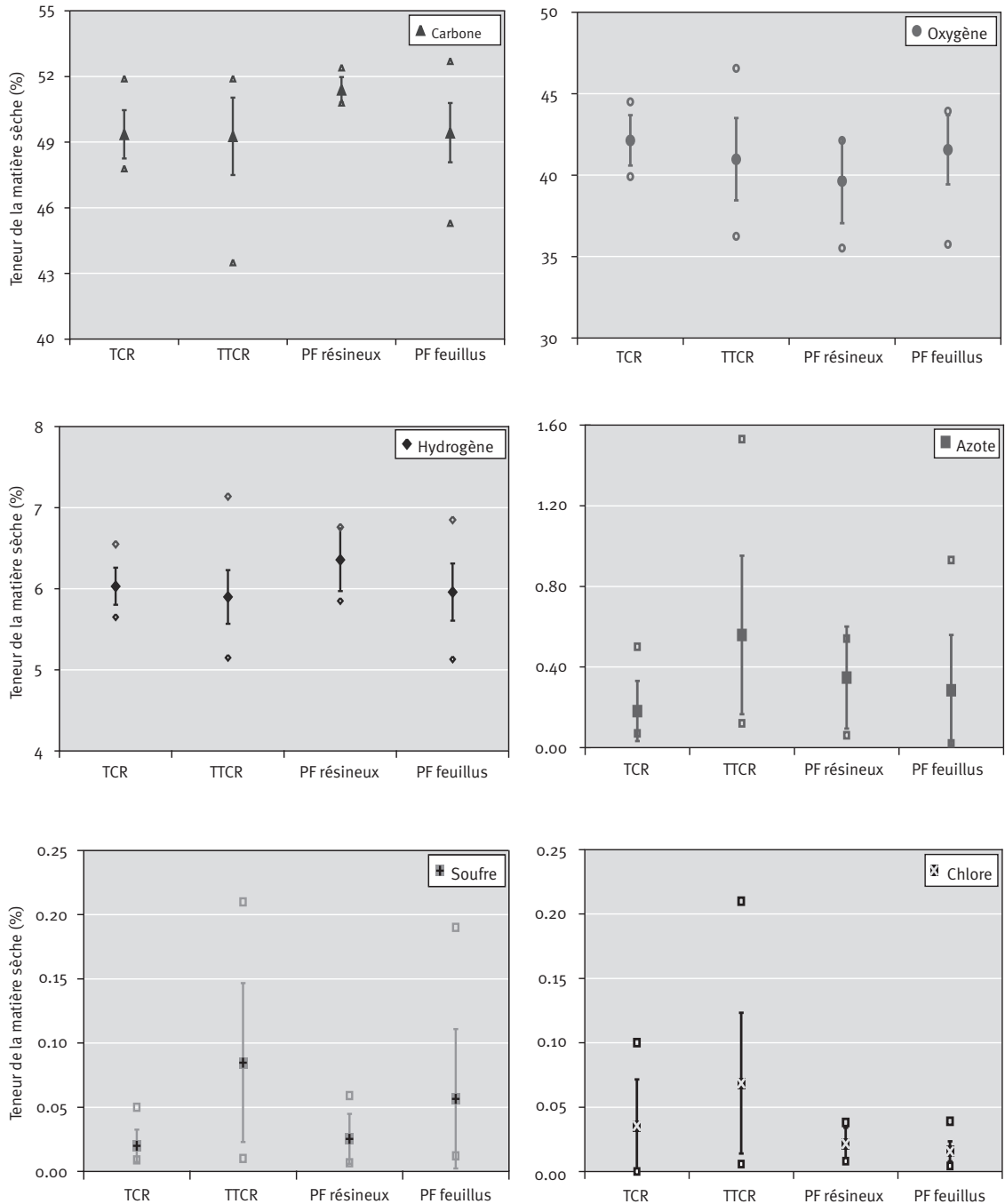
	Combustion	Gazéification	Gazéification (RFE*)
Carbone . . . . .			46-52 % MS
Hydrogène . . . . .			5-7 % MS
Oxygène . . . . .			40-46 % MS
Azote . . . . .	< 0,6 % MS	< 0,2 % MS	
Chlore . . . . .	< 0,1 % MS		< 0,02 % MS
Soufre . . . . .	< 0,2 % MS	< 0,1 % MS	< 0,06 % MS

\*Réacteur à flux entraîné.

La teneur en carbone de la biomasse forestière varie entre 48 et 53 % pour la plupart des produits et différentes essences considérés, à l'exception d'un échantillon de TTCR (brindille d'Eucalyptus) et d'un échantillon de plaquette forestière de feuillus (Chêne et Charme) qui présentent des valeurs plus faibles, respectivement 43 et 46 %. Les valeurs moyennes sont autour de 49 % pour les feuillus (TCR, TTCR et plaquettes forestières) et 51 % chez les résineux. Ces valeurs sont en parfaite adéquation avec les spécifications des procédés de gazéification en réacteur à flux entraîné (RFE).

Les teneurs en oxygène fluctuent entre 35 et 46 %, les valeurs les plus faibles étant obtenues pour des brindilles d'Eucalyptus, pour des plaquettes forestières vertes de résineux avec aiguilles, et pour des plaquettes forestières de rémanents feuillus. Les valeurs moyennes sont comprises dans les fourchettes de spécification, mais il y a une forte variabilité des valeurs et les minimums souhaités ne sont pas toujours atteints, en particulier chez les TTCR et les plaquettes de résineux. Cependant, ces valeurs ne sont pas rédhibitoires étant donné que la teneur en oxygène peut être modulée par l'humidité de la biomasse. Il convient aussi de rappeler que l'oxygène est calculé par différence et, à ce titre, les résultats doivent être pris avec précaution.

**FIGURE 1** **VALEURS MOYENNES (symboles pleins) ET EXTRÊMES (symboles creux), ET ÉCARTS-TYPES (barres) DES TENEURS DES ÉLÉMENTS PRINCIPAUX (C, O, H, N, S ET CL) POUR QUATRE CLASSES DE BIOMASSE FORESTIÈRE**



Les teneurs en hydrogène sont assez uniformes et sont comprises entre 5,1 et 7,1 % de la masse de matière sèche, ce qui place pratiquement tous les échantillons dans la fourchette des spécifications requises par les procédés pour cet élément. Cependant, à l'instar de l'oxygène, les teneurs en hydrogène sont également modulées par l'humidité de la biomasse. Les valeurs moyennes très stables pour les feuillus, qu'il s'agisse de TCR, de TCCR ou de plaquettes forestières sont autour de 6 %, tandis que les plaquettes forestières de résineux présentent des valeurs moyennes légèrement plus élevées à 6,3 %.

Les teneurs en azote sont, dans la plupart des cas, inférieures à celles observées pour les produits issus de l'agriculture, eux aussi analysés dans le cadre du projet REGIX, mais non présentés dans cet article. Les valeurs extrêmes sont comprises entre 0,02 et 1,53 %, les valeurs les plus importantes étant systématiquement obtenues sur des échantillons de type brindilles ou contenant des feuilles. Les échantillons de TCR présentent la valeur moyenne la plus faible (0,18 %), les plaquettes forestières étant moyennement azotées (0,28 % pour les plaquettes forestières de feuillus et 0,35 % pour les plaquettes de résineux) et les TCCR les plus riches (0,56 %). Ces valeurs sont dans la fourchette des procédés thermochimiques de combustion, mais l'écart-type de la classe TCCR démontre l'importante variation de cette teneur, ce qui place de nombreux échantillons au-delà de la limite fixée par les procédés. En revanche, pour la gazéification, à l'exception de la biomasse issue des TCR, peu d'échantillons respectent les spécifications des procédés en ce qui concerne la teneur en azote. La présence de feuilles ou aiguilles, écorce et brindilles et autres éléments de même nature ou encore la contamination accidentelle avec de la terre (cas de quelques échantillons de rémanents) sont à l'origine de ces écarts. La teneur en soufre varie entre 0,01 et 0,21 %, les plages de variation les plus fortes étant une nouvelle fois observées au sein des classes TCCR et plaquettes de feuillus. Les valeurs moyennes varient en ordre croissant comme ceci : TCR (0,020 %), plaquettes forestières de résineux (0,025 %), plaquettes forestières de feuillus (0,057 %) et TCCR (0,085 %). Seule la valeur moyenne des échantillons de TCCR ne respecte pas les spécifications procédés pour la gazéification en réacteur à flux entraîné, mais les écarts-types de la teneur en soufre des plaquettes forestières de résineux devront être reconsidérés pour une analyse plus fine.

La plage de variation de la teneur en chlore va de 0 (non mesurable) à 0,21 % pour un échantillon de TCCR d'Eucalyptus. Cependant, les valeurs moyennes sont de 0,02 % pour les plaquettes forestières, 0,04 % pour les TCR et 0,07 % pour les TCCR. Une variabilité importante (écart-type) est constatée pour les TCR et TCCR, ce qui démontre une tendance plus importante à la présence de chlore chez les jeunes individus. Les plaquettes, en particulier de feuillus, présentent des valeurs compatibles avec les seuils de la gazéification. En revanche, les échantillons de TCCR présentent en moyenne des valeurs beaucoup plus élevées que les spécifications maximales, même si l'ensemble des classes présente des valeurs en général plus faibles que la biomasse d'origine agricole.

Globalement, la biomasse d'origine forestière semble bien placée vis-à-vis des spécifications des procédés thermochimiques au niveau de l'analyse élémentaire, mais les échantillons de TCCR présentent des valeurs élevées d'azote, chlore et soufre. L'activité physiologique importante des végétaux jeunes, le rapport élevé entre écorce et bois et la présence de feuilles ou de brindilles sont les causes principales de cette différence de comportement.

L'autre critère de qualité ayant une importance majeure est la teneur en cendres et leur composition chimique. Même si des seuils inférieur et supérieur n'ont pas été identifiés par les acteurs « procédés », des spécifications de qualité de la composition ont été proposées, au moins pour la combustion (tableau IV, p. 141).

La teneur en cendres varie entre 0,3 et 8 %. Les échantillons ayant la teneur la plus élevée présentent systématiquement des quantités d'écorces importantes, ce qui entraîne des quantités

TABLEAU IV

**Spécifications procédés pour la qualité des cendres obtenues  
dans des procédés de combustion**  
(Sources : Partenaires REGIX)

Élément minéral	Seuils souhaitables pour la combustion
CaO .....	> 15 % de la composition des cendres
MgO .....	> 2,5 % de la composition des cendres
Na <sub>2</sub> O .....	< 0,6 % de la composition des cendres
K <sub>2</sub> O .....	< 7 % de la composition des cendres
Si <sub>2</sub> O .....	Pas de seuil formel

importantes d'éléments minéraux. La présence de feuilles est également un élément important à prendre en compte dans ce cas. En moyenne, ce sont les échantillons de TTCR qui présentent les teneurs les plus élevées (3,1 %) pour les raisons déjà mentionnées (rapport écorce/bois élevé dans les jeunes tiges et activité physiologique intense par rapport au bois adulte). La teneur en cendres des échantillons de plaquettes forestières de résineux et de TCR est inférieure à 2 %, tandis que les plaquettes forestières de feuillus présentent autour de 2,5 % de cendres en moyenne. Concernant les plaquettes forestières, leur teneur est généralement plus faible, avec une plage de variation de 0,3 à 3,7 %, car il s'agit la plupart du temps d'arbres adultes ou à un âge au moins comparable à celui des TCR. Enfin, contrairement aux échantillons agricoles, la teneur en silice n'est pas du tout à l'origine de la formation de cendres.

Les valeurs moyennes, extrêmes et les écarts-types de la teneur en cendres obtenus pour les mêmes quatre classes de biomasse forestière (TTCR, TCR, plaquettes forestières de résineux et plaquettes de feuillus) sont présentés en figure 2.

**FIGURE 2** **VALEURS MOYENNES (symboles pleins), EXTRÊMES (symboles creux)  
ET ÉCARTS-TYPES (barres)  
DE LA TENEUR EN CENDRES DE QUATRE CLASSES  
DE BIOMASSE FORESTIÈRE**

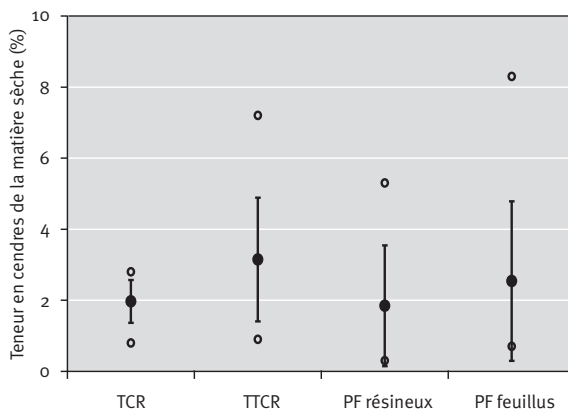
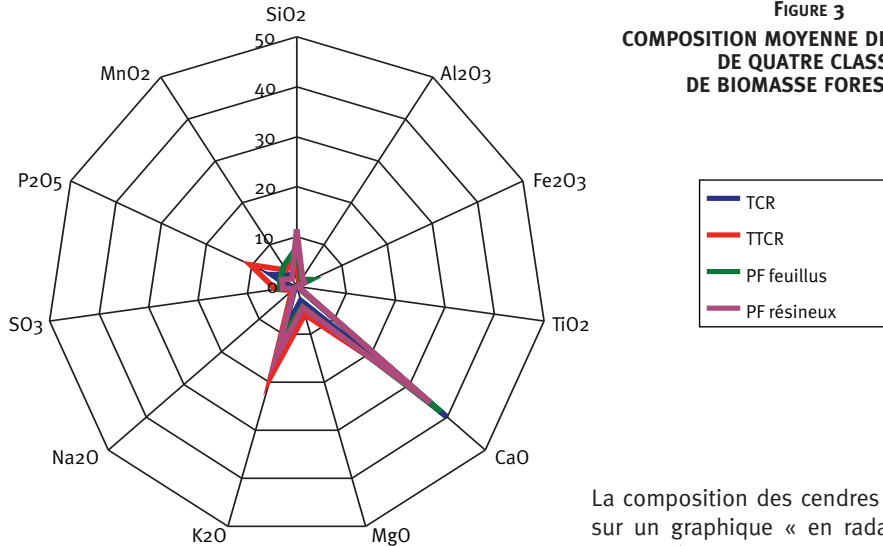


FIGURE 3  
 COMPOSITION MOYENNE DES CENDRES  
 DE QUATRE CLASSE  
 DE BIOMASSE FORESTIÈRE



La composition des cendres est présentée sur un graphique « en radar » (figure 3, ci-contre) permettant de comparer diffé-

rents composés et les quatre classes de biomasse forestière sur la même figure. On observe que le calcium est un élément majoritaire pour toutes les classes avec des valeurs en pourcentage exprimées en CaO qui atteignent 29 % pour les échantillons de TCR, 35 % pour ceux de plaquettes forestières de résineux, 38 % pour ceux de plaquettes forestières de feuillus et 40 % pour les TCR. Toutes ces valeurs moyennes respectent les spécifications des procédés. Cependant, la variabilité (non visible sur la figure 3, ci-dessus) est très élevée pour toutes les classes, à l'exception des échantillons de TCR, avec des écarts-types allant jusqu'à 17 %. Le deuxième élément le plus important dans les cendres est le potassium (dosé sous la forme de K<sub>2</sub>O) avec des pourcentages moyens de l'ordre de 10 % pour les échantillons de TCR et de plaquettes de feuillus, 15 % pour ceux de plaquettes forestières de résineux et 19 % pour ceux de TTCR. Le sodium, autre élément important, est présent sous la forme de Na<sub>2</sub>O à des teneurs moyennes de 0,5 % dans les cendres des échantillons de TCR, 0,75 % dans celles issues de plaquettes forestières et 1,3 % dans les échantillons de TTCR. Pour le potassium et le sodium, toutes les valeurs sont au-dessus des spécifications procédés et une conséquence directe de ces teneurs élevées est une augmentation importante de la température de fusion des cendres, ce qui risque d'entraîner des difficultés de pilotage des gazéificateurs. Quatrième élément figurant parmi les spécifications des procédés, le magnésium a un effet fondant pour les cendres à haute température et sa présence est souhaitable. Toutes les classes dépassent les seuils minimaux avec des pourcentages en MgO dans les cendres de l'ordre de 3 % pour les échantillons de TCR, 4 % pour ceux de plaquettes forestières et 6 % pour ceux de TTCR.

D'autres éléments ne faisant pas l'objet de spécifications procédés ont été également mesurés. La présence de silice, un agent fondant, est ainsi observée chez les plaquettes forestières à des pourcentages importants (11 % pour les plaquettes forestières de résineux et 8 % pour les plaquettes de feuillus), mais une partie peut être due à une contamination accidentelle lors de l'exploitation forestière. En effet, les pourcentages de SiO<sub>2</sub> dans les cendres des échantillons de TCR et de TTCR sont seulement de l'ordre de 3 et 6 % respectivement. Le phosphore, exprimé sous la forme P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, est présent à des pourcentages de 3 à 4 % dans les cendres de plaquettes forestières, mais ces valeurs sont beaucoup plus élevées dans les échantillons de TCR (6 %) et de TTCR (10 %). Concernant le manganèse, les cendres de plaquettes forestières de résineux en contiennent nettement moins (1,7 %) que les échantillons de feuillus (2,7 % pour les TCR, 3,8 %

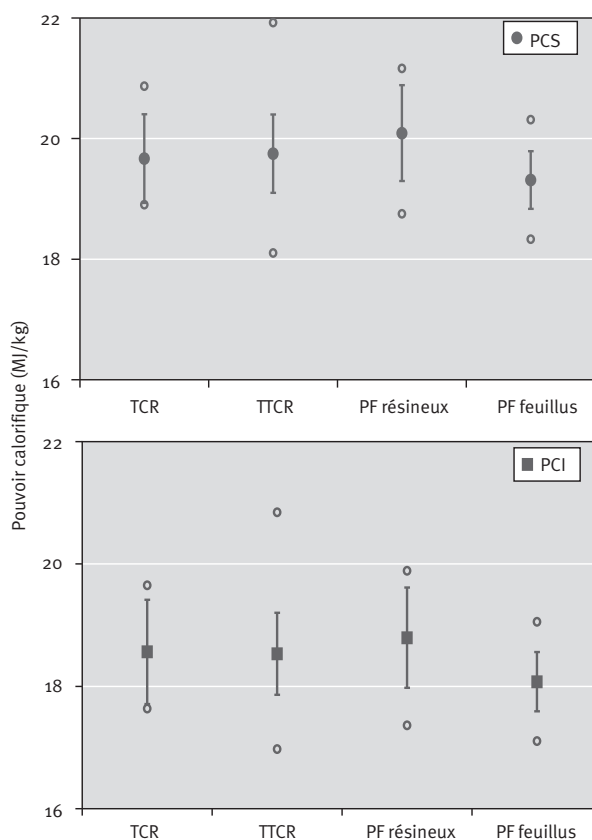


pour les TCR et 4,8 % pour les plaquettes forestières de feuillus). Le soufre résiduel dans les cendres (une partie du soufre se perd sous la forme de substances volatiles) présente le même comportement que les données déjà présentées pour le dosage total de cet élément, à savoir des valeurs assez faibles pour les échantillons de TCR (1,3 %), intermédiaires pour ceux de plaquettes forestières de résineux (2,7 %) et de feuillus (3,6 %) et élevées pour ceux de TTCR (4,3 %). Les oxydes des trois derniers éléments minéraux dosés (aluminium, fer et titane) présentent des valeurs inférieures à 2 % de la masse des cendres, à l'exception des cendres de plaquettes forestières de feuillus qui présentent 3,1 % de fer.

Le pouvoir calorifique est le dernier paramètre important pour les procédés thermochimiques analysés (figure 4). L'observation la plus importante concerne la différence déjà connue entre résineux et feuillus. Les premiers présentent des valeurs moyennes de pouvoir calorifique supérieur (PCS) légèrement supérieures à celles des feuillus, mais dans l'ensemble il y a peu de variabilité au sein des échantillons forestiers [moyennes variant entre 19 et 20,5 MJ/kg de matière sèche (MS)]. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) anhydre, qui dépend de la composition chimique, puisque l'énergie de vaporisation de l'eau formée à partir de la combustion de la biomasse est soustraite du PCS, varie entre 18 et 19 MJ/kg MS. Il est intéressant de mentionner que des brindilles ou feuilles chez les TTCR permettent d'avoir des valeurs de PCS et de PCI particulièrement élevées, tandis que la présence d'écorce entraîne un effet contraire.

FIGURE 4

**POUVOIR CALORIFIQUE SUPÉRIEUR (PCS) ET INFÉRIEUR (PCI)  
DE QUATRE CLASSES DE BIOMASSE FORESTIÈRE**

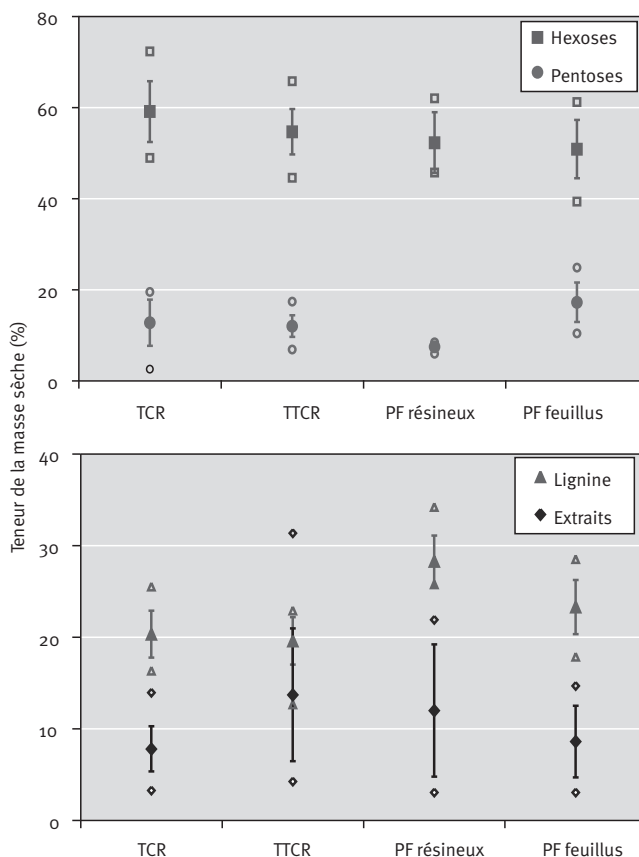


## Évaluation de la qualité de la biomasse vis-à-vis des procédés biochimiques

Le cahier des charges de procédés biochimiques est moins précis que celui des voies thermo-chimiques. Cependant, l'objectif majeur de la voie biochimique de biocarburants de deuxième génération est de valoriser les monosaccharides pour la production de bioéthanol après une étape d'hydrolyse acide ou enzymatique. Les hexoses sont facilement fermentescibles, tandis que les pentoses nécessitent soit l'emploi de microorganismes pouvant fermenter naturellement, mais dans une deuxième étape, soit la production de microorganismes par voie transgénique capables de fermenter à la fois les hexoses et les pentoses. La lignine apporte l'énergie nécessaire à la concentration de l'éthanol après fermentation, mais engendre la formation de composés inhibiteurs de fermentation. Il en est de même pour certains composés classés comme extractibles.

La composition chimique de ces quatre classes de composés (hexoses, pentoses, lignine et extractibles) est présentée pour les différentes classes de biomasse forestière étudiées (figure 5). Les données présentées dans cette section ne prennent pas en compte la partie minérale (résultats sans les cendres) car il est difficile d'estimer la solubilisation de ces composés minéraux pendant les différentes étapes de dosage.

FIGURE 5  
**COMPOSITION CHIMIQUE EN TERMES  
 DE MONOSACCHARIDES (hexoses et pentoses), LIGNINE ET EXTRAITS  
 DE QUATRE CLASSES DE BIOMASSE FORESTIÈRE**



Les échantillons de TCR présentent les teneurs moyennes les plus élevées en hexoses (59 %), suivi des TTCR (55 %), des plaquettes forestières de résineux (52 %) et enfin des plaquettes forestières de feuillus (51 %). Individuellement, certains échantillons de TCR atteignent 72 % d'hexoses, tandis que les valeurs les plus faibles sont observées pour un type de plaquettes forestières de feuillus (rémanents de taillis de Chêne) avec 40 % d'hexoses seulement. Les plaquettes forestières de résineux présentent des teneurs en pentoses nettement plus faibles (8 %) que les feuillus, qu'il s'agisse de TCR, de TTCR (environ 12 % chacun) ou de plaquettes forestières de feuillus (17 %).

Les teneurs élevées en hexoses observées pour les échantillons de TCR et de TTCR s'expliquent par des valeurs plus faibles de la teneur en lignine et en extraits, par rapport aux plaquettes forestières. Les échantillons de TCR présentent des teneurs moyennes en extraits assez faibles (8 %) par rapport aux autres classes, en particulier le TTCR (14 %) et les plaquettes forestières de résineux (14 %). D'autre part, tant les TCR que les TTCR bénéficient de valeurs faibles de la teneur moyenne en lignine (20 % environ) par rapport aux plaquettes forestières (23 % pour les plaquettes forestières de feuillus et 28 % pour les plaquettes forestières de résineux).

### CONCLUSIONS

Les différents types de biomasse forestière présentent des atouts intéressants pour la production de biocarburants de deuxième génération.

Concernant la voie thermochimique, les teneurs en carbone, oxygène et hydrogène ne posent pas de problème particulier. Les teneurs en azote, chlore et soufre sont nettement plus élevées que, de façon générale, pour la biomasse agricole, et restent parfois en dessus des maximums recommandés par les acteurs des procédés. Cela est particulièrement valable pour les échantillons de TTCR, ainsi que certains types de plaquettes forestières, quand la présence de feuilles ou de brindilles ou encore une contamination accidentelle avec de la terre se produit lors de l'exploitation forestière.

Les teneurs en cendres varient beaucoup, notamment en fonction de la présence d'écorces dans l'échantillon. Ceci est donc particulièrement gênant pour les échantillons de TTCR où le ratio écorce/bois est très élevé, ainsi que pour certains types de plaquettes forestières (rémanents, branches de faible diamètre, résidus d'exploitation forestière mécanisée, etc.). La composition des cendres est caractérisée par des teneurs de calcium, potassium et sodium qui dépassent les seuils recommandés par les acteurs des procédés thermochimiques. Cela impliquera l'ajout d'éléments fondants pour la fusibilité des cendres. La présence d'éléments comme le silicium ou le magnésium, même en faibles quantités, peut être un atout car ces éléments peuvent jouer partiellement ce rôle. Enfin, une faible variabilité est observée pour le pouvoir calorifique qu'il s'agisse de pouvoir calorifique supérieur ou inférieur.

Pour les procédés de la voie biochimique (bioéthanol), les teneurs en hexose, fraction la plus intéressante pour la fermentation, sont assez élevées, en particulier pour la biomasse de type TCR ou TTCR. Les échantillons de feuillus contiennent aussi des fractions importantes de pentose. Les teneurs en lignine sont élevées dans les plaquettes forestières, tandis que dans les échantillons de TTCR, c'est la teneur en extraits qui est particulièrement élevée.

La biomasse parfaite n'existe pas, mais il est intéressant de relever les atouts de chaque type d'échantillon forestier. Ainsi, les plaquettes forestières de feuillus ou de résineux sont bien en adéquation avec le cahier des charges de la voie thermochimique en ce qui concerne la composition élémentaire et le pouvoir calorifique. La teneur et la composition des cendres sont très

dépendantes des essences et du type de plaquette résultant du mode d'exploitation forestière. Les plaquettes de TCR présentent des teneurs en hexose intéressantes pour la voie biochimique. Cependant, concernant la composition élémentaire, les teneurs en azote, en soufre et en chlore, notamment, sont plus élevées que les spécifications des procédés. Il en va de même pour les teneurs en cendres. Les échantillons de TCR étudiés ici semblent être les mieux placés, car ils répondent à la plupart des spécifications des procédés. Il s'agit d'une biomasse plus homogène que les plaquettes forestières et qui évite les problèmes de qualité des plaquettes de TCR.

Si un nombre assez important d'échantillons a été analysé lors de ces deux campagnes, ce travail est loin d'être exhaustif. Il convient aussi de rappeler que les échantillons sont issus de chantiers expérimentaux. Toute extrapolation doit donc être évitée. Il en est de même pour la diversité d'espèces d'essences et de produits étudiés. Ce travail doit donc être enrichi par la suite afin que les tendances ici observées puissent être confirmées ou éventuellement infirmées si d'autres paramètres non couverts par l'expérimentation REGIX se révèlent par la suite déterminants pour la qualité de la biomasse.

Il est également important de rappeler que le projet REGIX a permis d'estimer seulement le potentiel de chacune des quatre classes de biomasse vis-à-vis des procédés de conversion thermo-chimiques ou biochimiques. Aucun type de biomasse n'a été testé en conditions de procédés, que ce soit en laboratoire ou à l'échelle pilote. Différents facteurs intrinsèques à la biomasse peuvent influencer positivement ou négativement sur les performances lors des transformations par les procédés mentionnés.

Denilson da SILVA PEREZ – Alain BERTHELOT  
Nicolas N'GUYEN THE – Audrey GUILLEMAIN  
Francis de MOROGUES – Michel PETIT-CONIL  
Institut technologique FCBA  
Domaine universitaire  
BP 251  
F-38044 GRENOBLE Cedex 9  
(denilson.dasilvaperez@fcba.fr) (alain.berthelot@fcba.fr)  
(nicolas.nguyenthe@fcba.fr) (audrey.guillemain@fcba.fr)  
(francisdemorogues@fcba.fr) (michel.petitconil@fcba.fr)

### Remerciements

Les auteurs remercient le soutien financier de l'Agence nationale de la recherche (ANR) dans le cadre du programme PNRB piloté par l'Agence nationale de la maîtrise de l'énergie (ADEME) à travers le projet REGIX (ANR-05-BIOE-017, convention ADEME 0501c0136).

## BIBLIOGRAPHIE

- BIOFUELS RESEARCH ADVISORY COUNCIL OF THE EUROPEAN COMMISSION, BIOFUELS IN THE EUROPEAN UNION. — A vision for 2030 and beyond, 2006. — 31 p. Disponible à l'adresse : [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/biofuels\\_vision\\_2030\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/biofuels_vision_2030_en.pdf).
- CASANAVE (D.), DUPLAN (J.-L.), FREUND (E.). — Diesel fuels from biomass. — *Pure Appl. Chem.*, 79, 2007, pp. 2071-2081.
- Da SILVA PEREZ (D.), CADOUX (S.), BRIAND (S.), CHABBERT (B.), LABALETTE (F.), LABOUBÉE (C.), LEYGUE (J.-P.). — Comparison of agricultural and forest biomass with regards to biological processes for bioethanol production of second generation. — Proceedings of the 18<sup>th</sup> European Conference on Biomass, Paper VP1.3.34, May 3-5, 2010a, Lyon (France).
- Da SILVA PEREZ (D.), GUILLEMAIN (A.), BERTHELOT (A.), N'GUYEN THE (N.), MOROGUES (F. de), GOMES (C.). — Evaluation of forestry biomass quality for the production of second-generation biofuels. — *Cellulose Chem. Technol.*, vol. 44, n° 1-3, 2010b, pp. 1-14.
- DUPONT (C.), ROUGÉ (S.), BERTHELOT (A.), da SILVA PEREZ (D.), GRAFFIN (A.), LABALETTE (F.), LABOUBÉE (C.), MITHOUARD (J.-C.), PITOCCHI (F.). — Bioenergy II: Suitability of Wood Chips and Various Biomass Types for Use in Plant of Btl Production by Gasification. — *Intl. J. Chem. React. Eng.*, 2010, 8, A74. Available at: <http://www.bepress.com/ijcre/vol8/A74>.
- EVANS (G.). — Liquid Transport Biofuels - Technology Status Report. — NNFCC, 2008. — 135 p. Disponible à l'adresse : [http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0711\\_NNFCC\\_Liquid\\_Transport\\_Biofuels\\_Technology\\_Status\\_Report.pdf](http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0711_NNFCC_Liquid_Transport_Biofuels_Technology_Status_Report.pdf).
- KUMAR (A.), JONES (D.D.), HANNA (M.A.). — Thermochemical biomass gasification: a review of the current status of the technology. — *Energies*, 2, 2009, pp. 556-581 ; doi:10.3390/en20300556.
- LABALETTE (F.), BRIAND (S.), LABOUBÉE (C.), da SILVA PEREZ (D.), LEYGUE (J.-P.). — Comparison and adequacy of agricultural and forest resources with the needs of thermochemical processes. — Proceedings of the 18<sup>th</sup> European Conference on Biomass, Paper VP1.3.38, May 3-5, 2010, Lyon (France).
- TIJMENSEN (M.J.A.), FAAIJ (Az.P.C.), HAMELINCK (C.N.), VAN HARDEVELD (M.R.M.). — Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification. — *Biomass and Bioenergy*, 23, 2002, pp. 129-152.
- VIRKAJÄRVI (I.), NIEMELA (V.), HASANEN (A.), TEIR (A.). — Cellulosic ethanol via biochemical processing poses a challenge for developers and implementers. — *BioResources*, 4, 2009, pp. 1718-1735.
- YONG LEE, HUBBE (M.A.), SAKA (S.). — Biodiesel from Wood Pulping. — *BioResources*, 1, 2006, pp. 150-171.

---

**QUALITÉ BIOÉNERGÉTIQUE DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE EN VUE DE LA PRODUCTION DE BIOCARBURANTS DE DEUXIÈME GÉNÉRATION (Résumé)**

Les carburants liquides de deuxième génération sont actuellement dans une phase de développement préalable à leur déploiement industriel. Ils offrent d'importantes perspectives de débouchés pour les ressources lignocellulosiques françaises, tant forestières qu'agricoles. Celles-ci étant limitées, il est nécessaire d'éviter non seulement la compétition avec la production agricole à vocation alimentaire, mais aussi la déstabilisation des filières déjà en place. Il apparaît donc indispensable que les acteurs de la recherche sur les ressources et les procédés travaillent en partenariat pour essayer de répondre ensemble à cette problématique. Le projet REGIX a permis d'évaluer l'adéquation de différents types de biomasse agricole et forestière aux besoins des procédés d'obtention de biocarburants de deuxième génération par les voies biochimique et thermochimique. Dans cet article, un aperçu de cette approche est donné pour quatre classes de biomasse forestière : taillis à courte et à très courte rotation (TCR et TTCR), plaquettes forestières de feuillus et de résineux. Les résultats démontrent une bonne adéquation de ces classes pour la plupart des spécifications des procédés, mais quelques inconvénients ont été également relevés, en particulier dans le cas des TTCR.

**BIOENERGETIC PROPERTIES OF FORESTRY BIOMASS FOR PRODUCING SECOND-GENERATION BIOFUELS (Abstract)**

Second-generation liquid fuels are now at the development stage that precedes their industrial implementation. They offer significant market opportunities for French lignocellulosic resources both from forests and crops. Those resources are limited and it is important to avoid competing against food crops or destabilising the sectors that already operate. It is therefore essential for the actors in research on these resources and processes to work in partnership and produce a common response to these issues. The REGIX project has provided an assessment of the suitability of various types of forests and cultivated biomass to the needs of processes for producing second-generation biofuels via biochemical and thermochemical processes. This article provides an overview of this approach for four classes of forest biomass: short and very short rotation coppice (SRC and VSRC), wood chips from hardwoods and from softwoods. The results show that these classes are very well-suited to most of the specifications for these processes, but a number of drawbacks were also noted, in particular for VSRC.

---