

Valorisation énergétique de certains produits de l'agriculture par densification

Youri Bartel, Pierre Dehon, Daniel Samain,
Jean-Claude Verbrugge

Une étude technique de valorisation énergétique de produits agricoles a été entreprise au cours de l'année 1994-1995 à la Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux. La valorisation de la biomasse végétale résiduelle par densification peut fournir un biocombustible constituant une source d'énergie renouvelable [1-3]. Ce travail se place donc dans le cadre des économies d'énergie et des études relatives à l'environnement, mais aussi dans le contexte relatif à l'autorisation de cultiver les jachères en cultures énergétiques dans l'Union européenne. Actuellement, certaines pailles sont laissées en place et enfouies dans le sol ; leur biomasse pourrait constituer un débouché non alimentaire susceptible de valoriser la jachère. La recherche a été axée sur les sous-produits ou déchets de l'agriculture et sur les conditions préalables à leur densification. Des essais pratiques ont ensuite été réalisés et les caractéristiques techniques ou écologiques des produits obtenus ont été précisées. Les opérations préalables à la densification nécessitent, dans certains cas, un broyage et un séchage. *A priori*,

certaines conditions doivent être réunies : humidité (par rapport au poids humide) inférieure à 10 %, granulométrie de 1 à 10 millimètres, taux de lignine supérieur à 15 %.

Matériel et méthodes

Les résidus des produits suivants ont été analysés : pailles de colza, pailles de maïs grain, « miscanthus », renouée du Japon, divers bois ou leurs dérivés ainsi que des résidus industriels.

Le colza (*Brassica napus* L.) est cultivé pour la graine en vue de fournir des tourteaux et de l'huile comestible ou énergétique (biodiesel). À la récolte, les rendements atteignent 3 à 4 t/ha de grains [3, 4], et 4 à 6 t/ha (à 9-10 % d'humidité) de paille [5]. Du point de vue du bilan énergétique moyen, la paille représente deux fois plus de contenu énergétique que l'huile raffinée. Le bilan énergétique du biodiesel utilisé comme carburant est positif : on obtient en moyenne, par unité dépensée en production (engrais, produits phytosanitaires et transformation industrielle), 2,5 unités d'énergie (biodiesel, tourteaux et glycérine) [5].

Le maïs (*Zea mays* L.) est cultivé pour la graine, qui peut être utilisée pour l'alimentation ainsi que pour la production d'huile ou de bioéthanol. Après récolte, les pailles sont laissées sur le champs ; elles seront ensuite enfouies. La production de matière sèche anhydre (tiges, feuilles et rafles), peut atteindre de 5 à 6 t/ha en moyenne [6].

Le « miscanthus » (*Miscanthus sinensis giganteus*) présente une hauteur de tige de 3 mètres environ, avec un potentiel probable de production de matière sèche de 10 à 15 t/ha pour 5 000 à 10 000 pieds/ha ; il a souvent été utilisé comme plante ornementale [7].

La renouée du Japon (*Polygonum cuspidatum* Sieb et Zucc.) est une plante très envahissante de 1 à 2,5 mètres de haut, qui pousse dans les terrains vagues, sur les berges des cours d'eau, sur les talus d'autoroutes ou voies ferrées (la production de matière sèche, en t/ha, ne nous est pas connue, mais cette plante est choisie pour montrer l'intérêt que l'on peut porter à la biomasse).

Le bois a fait l'objet d'importantes études de densification [8, 9]. Nous avons choisi, dans le présent travail, le bois de sureau ainsi que les sciures de méranti (*Shorea* sp. div.) et de sapin d'Autriche.

Comme déchets industriels, nous avons utilisé les déchets de cardage du lin, la coquille de fruits secs et le papier.

La densification est un processus fondé sur des traitements physiques visant à obtenir des structures solides caractérisées par une masse spécifique apparente élevée. Certaines techniques utilisent des presses à piston ou à vis cylindrique à manteau chauffant. Nous avons employé, pour notre part, la technique d'extrusion sans ajout de liant. L'intérêt de cette presse réside dans la possibilité d'obtenir un produit fini dense, homogène et de bonne qualité (l'intérieur de la brique obtenue ne se décompose pas lors de la combustion, ce qui permet une calcination plus complète du produit et

Y. Bartel, P. Dehon, J.-C. Verbrugge :
Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux. Unité de résistance des matériaux et constructions du génie rural, 2, passage des Déportés, 5030 Gembloux, Belgique.

D. Samain : Vard Broyeurs et procédés, Société anonyme, 345, chaussée de Waterloo, 5002 Namur, Belgique.

Tirés à part : Y. Bartel

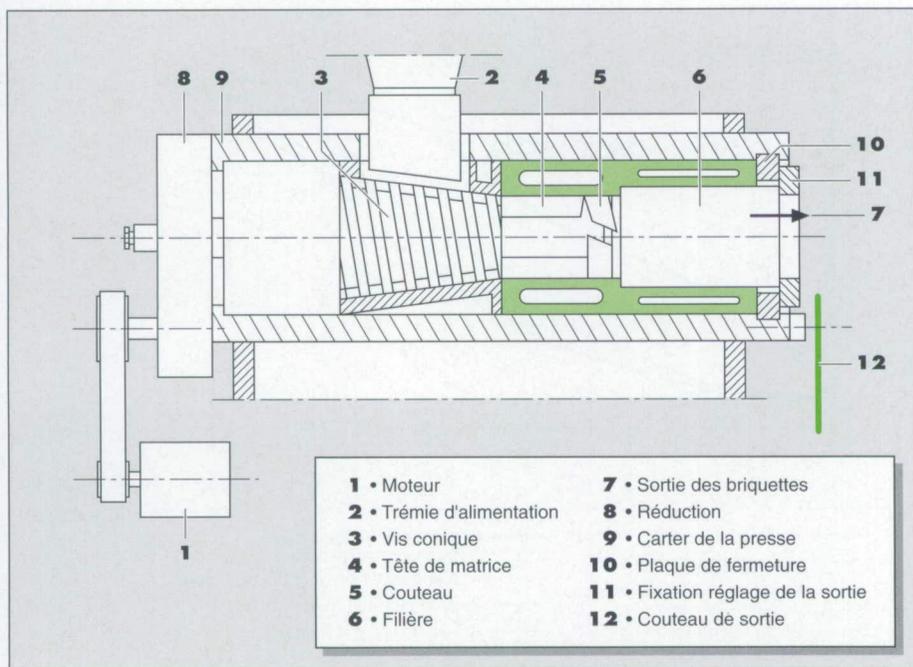


Figure 1. Schéma de la presse à densifier.

Figure 1. Diagram of the densification press.

un apport de chaleur plus régulier). Ce procédé ne convient pas pour tous les produits, et un des buts était d'identifier les critères d'acceptation des matériaux. Le procédé d'extrusion utilisé comporte des pièces d'usure (comme la vis, la tête de poussée et la matrice, voir *figure 1*). La vis conique, par friction, pousse la matière et fait augmenter la température de celle-ci qui devient pâte ; la matière est répartie par le couteau de la tête au niveau de la matrice pour être ensuite poussée dans les différentes filières. On obtient de la sorte des briquettes de forme cylindrique qui durcissent en se refroidissant et dont le diamètre peut varier de 28 à 75 millimètres.

L'analyse granulométrique [10] s'effectue au moyen d'un jeu de tamis à mailles carrées, agités à raison de 3 500 vibrations/min. pendant 5 minutes, précédée d'un broyage par broyeur à marteau muni d'une grille de maille de 10 millimètres de diamètre.

Le taux de lignine est déterminé par la méthode dite de « Van Soest » [11], méthode d'analyse où les principaux constituants des fibres végétales sont extraits par différentes solutions détergentes. Avant l'analyse, les échantillons

sont broyés à l'aide d'un « cyclotec » ayant une grille de mailles de 1 millimètre, ceci dans le but d'avoir des échantillons homogénéisés. On procède à une extraction neutre puis acide, ainsi qu'au traitement par une solution d'acide sulfurique et calcination. Ce type d'analyse fournit la composition des produits en hémicelluloses, celluloses, lignine, minéraux et cendres.

L'humidité des produits (rapport de la masse en eau à la masse totale) a été déterminée en soumettant les échantillons de masse connue à une dessiccation à l'étuve (105 °C) jusqu'à masse constante.

Le contenu en silice (SiO₂) a été déterminé par la méthode AOAC [12] où les échantillons, après broyage à 0,5 millimètre et mesure de la matière sèche, sont soumis à un mélange d'acide (HNO₃ et HClO₄), une filtration et une calcination à 1 100 °C pour attaquer ensuite le résidu par acide fluorhydrique et pesée finale.

La masse spécifique apparente en vrac, avant et après broyage des produits, représente un ordre de grandeur et correspond (aux taux d'humidité mesurés) à la masse d'un échantillon de chaque produit contenu dans un récipient de volume connu.

La mesure du pouvoir calorifique supérieur à volume constant a été déterminée au moyen d'une bombe calorimétrique adiabatique PARR. On y brûle, dans un volume constant, un poids donné de combustible dans une atmosphère d'oxygène sous pression de 30 bars ; la chaleur dégagée est absorbée par une quantité d'eau dans laquelle la bombe est entièrement immergée. L'élévation de tempéra-

Figure 2. Humidité (% de la masse humide) des produits.

Figure 2. Moisture content of products (% wet mass).

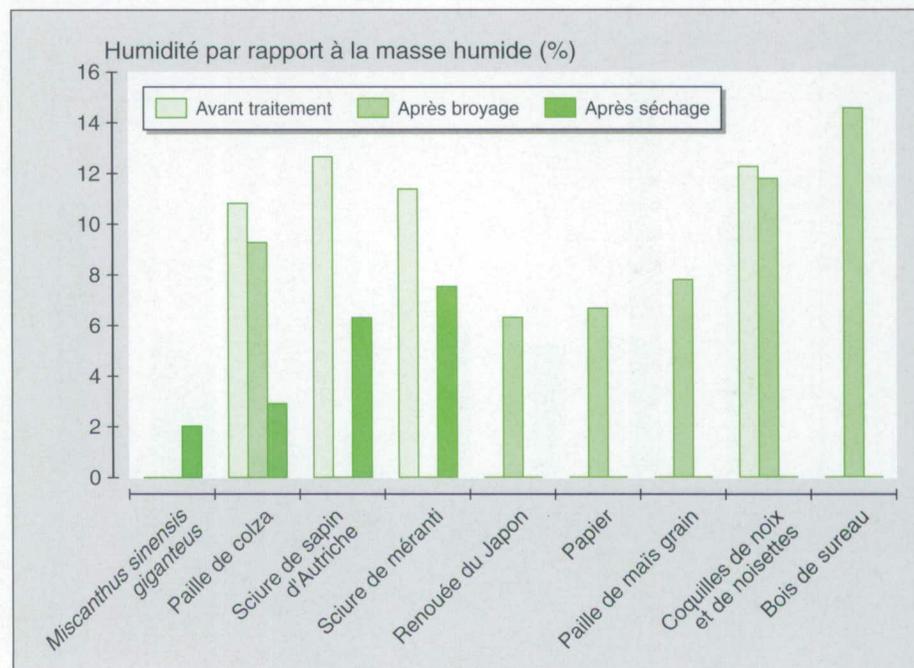


Figure 3. Courbes granulométriques des produits.

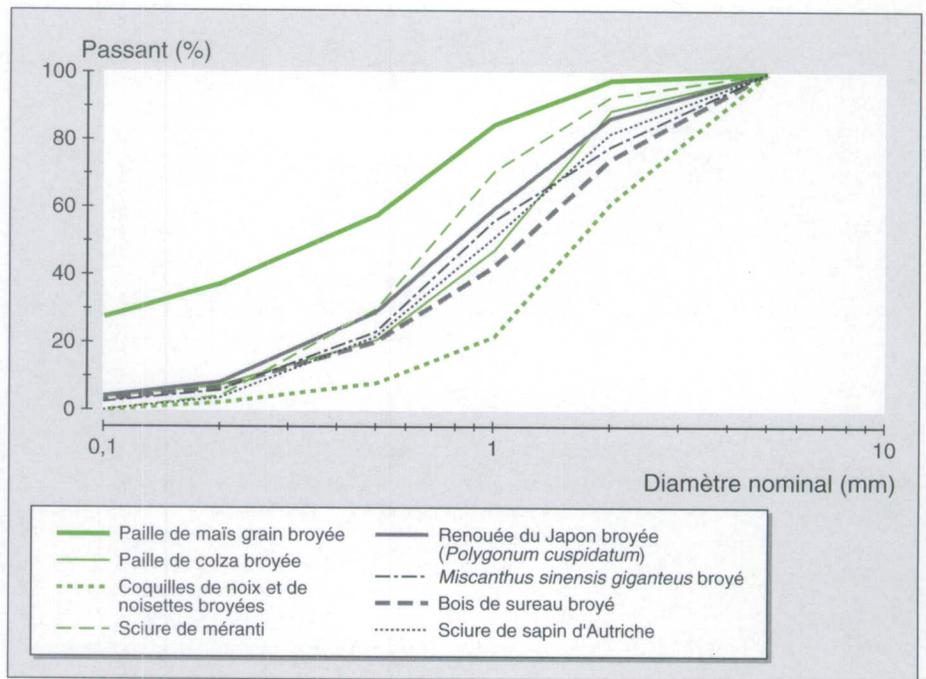
Figure 3. Granulometric curves for each product.

ture de cette eau permet le calcul du pouvoir calorifique supérieur à volume constant, la vapeur d'eau étant toujours condensée dans ces conditions.

En ce qui concerne la combustion, nos observations sont de nature plus qualitative que quantitative (pompage de fumées à travers une buse d'aspiration avec analyse simultanée des teneurs en CO, CO₂ et hydrocarbures imbrûlés au-dessus d'un foyer de combustion) et ne donnent qu'une tendance de comparaison entre les produits, l'utilisation du combustible pouvant être domestique ou industrielle.

Résultats et discussion

Le débit du système de densification est d'environ 750 à 1 000 kg/h de produits pour une puissance absorbée de 75 à 100 kW. Certains produits présentent des humidités variables (figure 2), avec parfois une hétérogénéité d'humidité au niveau de la tige. Un taux d'humidité trop élevé donne un produit mal densifié. Les courbes granulométriques des



produits (avant densification) sont présentées à la figure 3. Le taux de lignine (figure 4) se situe aux environs de 30 % pour les produits cellulo-ligneux (sapin, sureau, méranti), de 20 % pour la renouée du Japon et les coquilles, de 10 % pour les pailles de colza, maïs et miscanthus ; il est très bas pour le papier et les déchets de lin. Des tests de silice [7] (figure 5) indiquent soit un produit qui a pu être souillé par la terre suite à des conditions pluvieuses au moment de

la collecte, soit un taux de silice intrinsèquement élevé, propre à la plante (renouée du Japon). La présence de silice constitue un inconvénient pour la densification, eu égard à l'usure des pièces qui peut être importante.

La masse spécifique apparente [7] (figure 5) augmente après broyage, sauf pour des produits compacts (miscanthus, papier). Après densification, les masses spécifiques apparentes des briquettes sont généralement supérieures à 1 000 kg/m³ (figure 5). La mesure du pouvoir calorifique supérieur à volume constant [7] (figure 6) montre que la plupart des produits présentent une valeur se situant entre 16 000 à 21 000 kJ/kg. Par comparaison, le charbon de bois (29 260 kJ/kg environ) est peu dense, moins propre à manipuler que les produits densifiés, et se consomme moins bien à l'air libre, contrairement aux produits densifiés. La combustion est du type complète (dégage-ment du CO₂), ou incomplète (dégage-ment du CO). L'observation de la combustion à « l'air libre » et l'analyse des fumées indiquent [7] que le charbon de bois ainsi que les briquettes de maïs et de *Polygonum* émettent une plus grande quantité de CO que les autres produits densifiés.

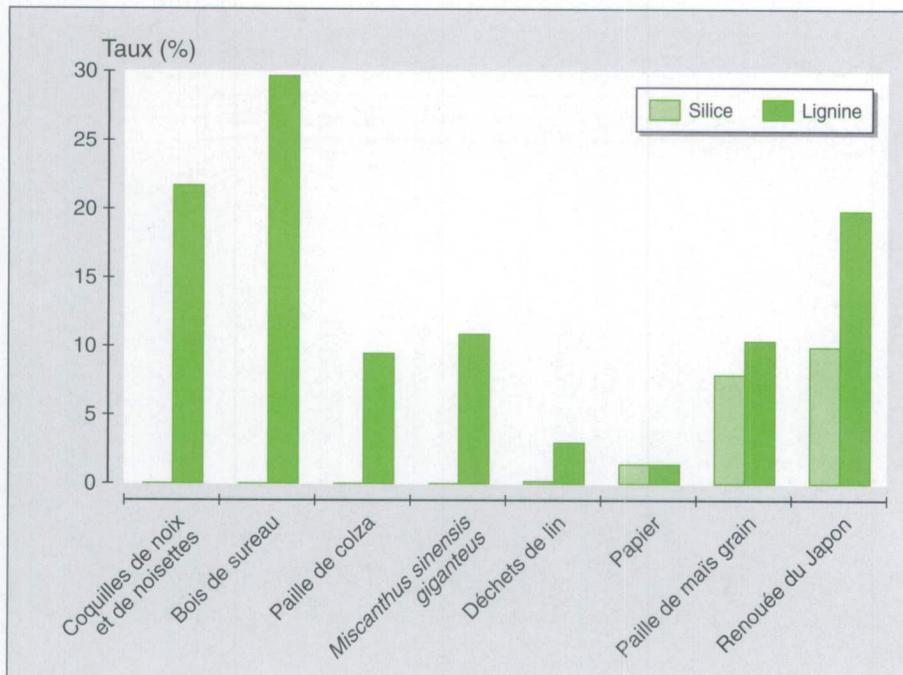


Figure 4. Taux en silice et lignine des produits (%).

Figure 4. Lignin and silice levels (%) in the products.

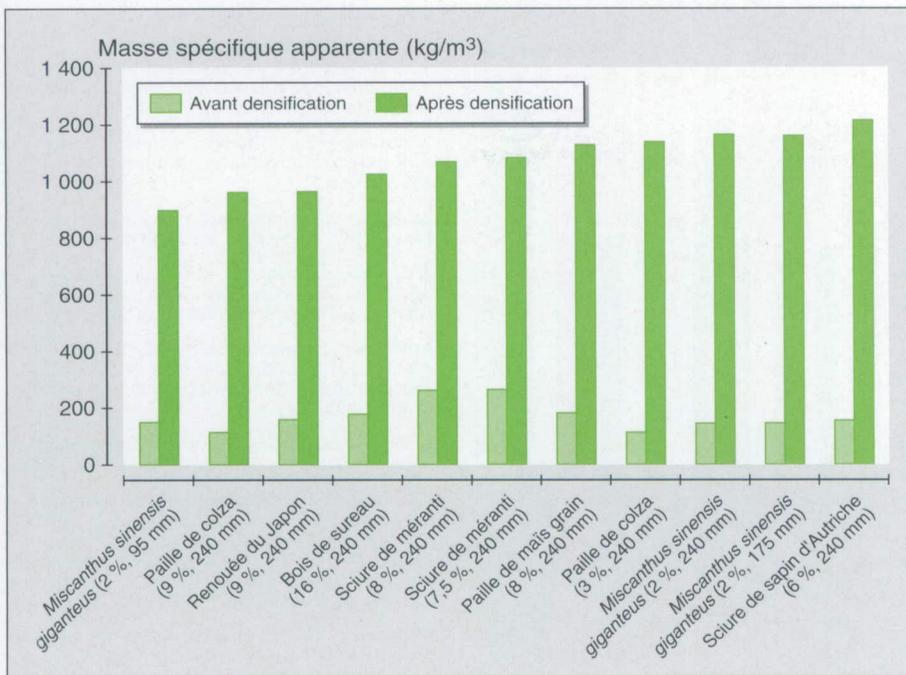


Figure 5. Masses spécifiques apparentes des produits (kg/m³) avant et après densification.

Figure 5. Product densities (kg/m³) before and after densification.

Au point de vue du bilan global, délicat à interpréter, les parts énergétiques relatives du processus sont évaluées comme suit.

Pour 10 000 hectares de maïs, à 6 t/ha de matière sèche et pour des teneurs en eau variant de 30 à 10 % (que l'on voudrait ramener à 5 %) :

- contenu en énergie de la biomasse : 960.10^9 kJ ;
- énergie à fournir pour fabriquer le produit : part énergétique du séchage, $85,7.10^9$ kJ à $13,3.10^9$ kJ ; part énergétique du broyage préalable pour obtenir la granulométrie adéquate des produits (500 kg/h de matière sèche pour une puissance nécessaire de 15 kW), $6,48.10^9$ kJ ; part énergétique de la densification, $21,6.10^9$ kJ.

Soit un rendement énergétique global (broyage-séchage-densification) de 8 à 23 environ.

La presse qui donne satisfaction, dans les conditions indiquées, a un rendement énergétique (rapport entre l'énergie nécessaire pour la faire fonctionner pendant une heure et l'énergie contenue dans les briquettes fabriquées) de 53 environ, ce qui serait le rendement énergétique global pour un produit disponible sur place, sec et de granulométrie adéquate.

Conclusions et perspectives

La recherche et le tri de déchets de plantes, relativement accessibles en Europe ou même dans le Tiers-Monde (en utilisant des produits moins nobles que le bois), présentent un intérêt énergétique dans le cadre d'un ensemble agricole cohérent (jachères) prenant en compte les aspects écologiques, ce qui permet de définir certaines filières intéressantes. Les produits densifiés peuvent être utilisés comme combustible (sous forme de briquettes en vue de fournir de la chaleur, ou de la vapeur comme source d'énergie mécanique) mais aussi pour la production d'électricité. Par cogénération, l'électricité et la chaleur peuvent être produites simultanément.

La rentabilité ne peut s'analyser qu'au cas par cas en fonction des conditions locales, sur la base des coûts des facteurs suivants : la collecte, la manutention et le type de matière première, les déchets et le broyage, le séchage (type, récupéra-

Summary

Densification of some agricultural products for energy recovery

Y. Bartel, P. Dehon, D. Samain, J.-C. Verbrugge

A study of renewable energy sources (agricultural biomass) was conducted using waste from common agricultural products, i.e. straw from rapeseed, maize, miscanthus and polygonum, along with flax residue. Yields of 4 to 6 t/ha were obtained for rapeseed and maize. During the densification process (rotational), the raw material was axially carried by a conical screw into a compression chamber (Figure 1). Power consumption ranged from 75 to 100 kW to produce 750 to 1,000 kg/h of briquettes. Some preprocessing conditions are required: less than 10% moisture content (Figure 2); particle size under 10 mm (Figure 3); and around 15% lignin (Figure 4). Lignin is liquefied and acts as a natural bond, which is cooled with the densified material. Successful tests were carried out with rapeseed and maize straw, and wood sawdust. Further research is required on miscanthus (unsuitable for briquettes), polygonum (excessive silex content) and flax wastes. The features of the processed products were as follows: briquette density above 1,000 kg/m³ (Figure 5); high calorific value at constant volume, ranging from 16,000 to 21,000 kJ/kg (Figure 6); and complete combustion. This process provides a solution for waste disposal, yielding a clean final product, with possible automation for utilization.

Cahiers Agricultures 1997 ; 6 : 208-12.

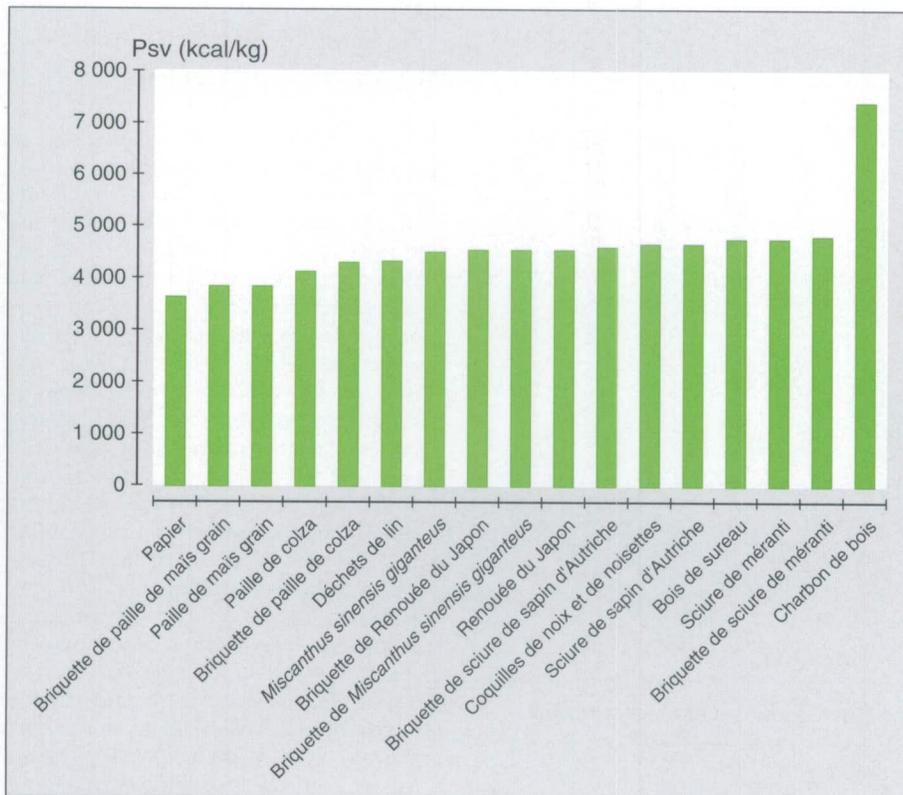


Figure 6. Pouvoir calorifique supérieur à volume constant (Psv) des produits (kcal/kg).

Figure 6. Higher calorific rate (kcal/kg) at constant product volume (Psv).

tion possible d'énergie), le stockage, la densification, le conditionnement et le marketing. Par rapport au compost (qui peut être utilisé à l'état humide), la densification nécessite des produits secs dont la teneur en humidité est inférieure à 10 %. Dès le départ, certaines conditions (humidité, taux de lignine, granulométrie) doivent être rencontrées ; le taux de matière minérale doit être faible (coût de la maintenance). Avec le mode de densification que nous avons utilisé, les meilleurs résultats ont été obtenus avec la sciure de sapin, la paille de colza (malgré un taux de lignine de 9 %), la sciure de méranti et la paille de maïs. Le miscanthus ne convient pas dans le cadre de cette technique, tandis que la renouée du Japon présente un caractère marginal, du fait de l'accès limité à la collecte, du taux de silice élevé et des problèmes de fumée. Les déchets de lin, quant à eux,

nécessiteraient un autre type de densification.

Les critères clés pour réaliser une bonne densification sont le choix d'une presse à vis conique sans ajout de liant utilisant des produits à humidité inférieure à 10 % (par rapport au poids humide), à granulométrie de 1 à 10 millimètres et à taux de lignine supérieur, en principe, à 15 %. Le coût énergétique global de cette chaîne de fabrication (broyage – séchage – densification) est dérisoire, ce qui est surprenant. Pour améliorer le procédé évoqué, de nouvelles pistes de recherches seraient envisageables : trouver une plus grande gamme de résidus (surtout dans le Tiers-Monde) ou de produits pouvant s'adapter à ce type de fabrication, étudier l'usure des pièces à plus longue échéance, cerner les conditions locales ou générales permettant d'en apprécier la rentabilité économique ■

Références

1. European Commission. Gen. Dir Energy (DG XVII). *Seminar on energy from biomass and waste*. Valladolid (Spain), 17,18,19/V/1995.
2. Ministère de la Région wallonne. *Guide des énergies renouvelables*. Namur (Belgique), 1994 ; 318 p.
3. Kisgeci J. *Agricultural biomass for energy*. FAO, CNRE, study n° 4, 1989 ; 58 p.
4. Institut national de statistique. *Statistiques agricoles*. Bruxelles (Belgique) : ministère des Affaires économiques, 1995, 1 ; 87 p.
5. Wolfensberger U, Stadler E, Schies. *Ester méthylique de colza comme carburant pour moteurs diesel*. Tänikon (Suisse) : Rapport FAT n° 427, 1993 ; 12 p.
6. Piccioni M. *Dictionnaire des aliments pour les animaux*. Bologne : Edizioni Agricole, 1965 ; 640 p.
7. Bartel Y. *Étude technique de valorisation énergétique de certains produits de l'agriculture, unité de résistance des matériaux – constructions du génie rural, travail de fin d'études*. Gembloux (Belgique) : Faculté des sciences agronomiques, 1995 ; 98 p.
8. Hébert J. *Contribution à l'étude de la valorisation énergétique des résidus végétaux par la densification*. Thèse de doctorat. Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux, Belgique, 1988 ; 154 p.
9. Lequeux P, et al. *Énergie et biomasse : la densification*. Presses Agronomiques de Gembloux (Belgique), 1990 ; 188 p.
10. Investigation of the raw material in hard coal-mining. Determination of the particle size $\geq 20 \mu$ by the sieve analysis. DIN 220 19/1. Beuth. Burggraben Strasse n° 6, 10787 Berlin, 1970 ; 16 p.
11. Huret F, Foucart M, Deroanne C. Étude par une méthode simple et rapide, de l'évolution des composés carbonés du bois soumis au compostage. *Bull Recherche Agron Gembloux* (Belgique) 1989 ; 24 : 49-65.
12. Official methods of analysis of the Association of official analytical chemists. AOAC method 1017 Silica (8). In : Horwitz W, ed. 13th edition. Washington DC : AOAC, 1980.

Résumé

Des essais de densification menés sur des sous-produits ou déchets de l'agriculture ont montré que certains de ceux-ci présentent des qualités énergétiques et écologiques intéressantes. En dehors des sciures de ligneux, on peut retenir comme performantes les pailles de colza et de maïs. D'autres produits agricoles ne sont pas directement adaptés à cet usage, comme le miscanthus, la renouée du Japon ou les déchets de lin.