Amélioration de l'autonomie énergétique et de l'impact environnemental d'une unité de trituration de tournesol par l'implantation conjointe d'un atelier de décortilage et d'une chaudière à coques

Sylvain TOSTAIN
Pierre CHERVIER
Alain LAULAN
Thomas KERMORGANT

SAIPOL Services Centraux,
Service Recherche & Développement,
Boulevard maritime,
76530 Grand-Couronne,
France
<s.tostain@saipol.fr>

Article reçu le 19 septembre 2012
Accepté le 1^{er} octobre 2012

Abstract: Improving energetic independence and environmental impact of a sunflower crushing plant by implementing a dehulling unit in combination with a hull-burning boiler

Fibre rich sunflower hulls have always been regarded as having a remarkable calorific value (5 000 kWh/t DM), very close to that of wood. Rising energy costs, emergent environmental concerns, and fitness for use of sunflower derived products have led to a growing interest in the dehulling of sunflower seeds prior to crushing, and burning of hulls in biomass boilers to yield process steam on site. This was made possible by prominent technological improvements in boiler technology. The torsional chamber technology exhibits good performances in full combustion of sunflower hulls, allowing for a high efficiency, a great flexibility, and a limited emission of pollutants. Yet, fumes may still have to be post-treated to ensure compliance with stringent restrictions in dust emissions. Being a robust and versatile technology, the torsional chamber is able to cope with a feedstock quality varying to a certain extent. The general design of a crushing plant fitted with a dehulling unit is impacted dramatically and becomes very sensitive to variations in hullability of the incoming seeds. Hull content and size of the seeds are correlated positively to hullability; moisture, density and oil content being correlated negatively. Hullability is affected mostly by environmental effects, cultivars being responsible for it to a lesser extent. Thus, hullability is impacted by upstream practices in plant breeding, field, and grain elevator management. Success in an efficient hulling strategy not only depends on the use of relevant technologies on processing plants, but also relies on knowledge of the seed and meal customer needs, as well as on concerted actions at various levels along the sunflower chain.

Key words: sunflower, dehulling, biomass, boiler, process, seed quality

Après avoir longtemps été la principale source de production d'énergie accompagnant le développement des activités artisanales et industrielles au cours des siècles, la biomasse est quelque peu tombée en désuétude avec l'avènement des combustibles fossiles au tournant du dix-neuvième siècle, et plus encore tout au long du vingtième siècle. Toutefois, la raréfaction des ressources, le

renchérissement des matières premières et la spéculation, ainsi que la recherche d'une intégration plus harmonieuse des activités humaines dans leur environnement suscitent aujourd'hui de profondes remises en cause du modèle industriel fondé sur les énergies fossiles. Ainsi, la biomasse suscite un fort regain d'intérêt soutenu par des progrès techniques significatifs permettant une valorisation

à grande échelle de ressources renouvelables variées et disponibles localement, mais dont les caractéristiques peuvent parfois se révéler très hétérogènes et variables. Le transport et la conservation de cette biomasse s'avérant parfois complexe, ces nouveaux développements sont bien souvent accompagnés par la mise en place d'une logistique de valorisation de proximité. En outre,

Pour citer cet article : Tostain S, Chervier P, Laulan A, Kermorgant T. Amélioration de l'autonomie énergétique et de l'impact environnemental d'une unité de trituration de tournesol par l'implantation conjointe d'un atelier de décortilage et d'une chaudière à coques. OCL 2012 ; 19(6) : 332-340. doi : 10.1684/ocl.2012.0485

l'industrie de la nutrition animale est également à la recherche de sources de protéines d'origine locale pouvant se substituer au tourteau de soja d'importation dont elle est encore très dépendante.

Dans ce contexte, le décorticage du tournesol pour la valorisation énergétique des coques connaît aujourd'hui de nouvelles perspectives de développement, permettant la valorisation à grande échelle d'une biomasse régionale annuellement renouvelable présentant parfois une forte variabilité selon les années et les origines, ce qui pose malgré tout d'évidents défis industriels et technologiques. D'après Borredon *et al.* (2011), 75 à 80 % de la trituration mondiale de tournesol intégrerait aujourd'hui cette solution technique, encore très peu présente en Europe occidentale.

De nouveaux enjeux dans un contexte favorable

La loi dite « Grenelle 1 » (JORF, 2009) définit les fondements d'un appui au développement des énergies renouvelables en prévoyant la mise en place d'un « fonds de soutien au développement de la production et de la distribution de chaleur d'origine renouvelable ». Elle prévoit également la contribution de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) dans l'aide au développement des énergies renouvelables. La Loi Grenelle 1 affirme le caractère renouvelable de la biomasse et introduit également sa définition dans la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique, stipulant « La biomasse est la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers. » (JORF,

Figure 1. Structure d'un akène de tournesol en coupe transversale.

2009). La loi Grenelle 2 (JORF, 2010) réaffirme et concrétise l'engagement de la Loi Grenelle 1, modifiant notamment le Code de l'Environnement de façon à introduire les schémas régionaux du climat, de l'air, et de l'énergie valant schémas régionaux des énergies renouvelables au sens de la loi Grenelle 1, et élaborés conjointement par les préfets de régions et les conseils régionaux. Ces derniers définissent « par zones géographiques, les objectifs qualitatifs et quantitatifs à atteindre en matière de valorisation du potentiel énergétique terrestre, renouvelable et de récupération et en matière de mise en œuvre de techniques performantes d'efficacité énergétique telles que les unités de cogénération, notamment alimentées à partir de biomasse, conformément aux objectifs issus de la législation européenne relative à l'énergie et au climat » (JORF, 2010). Dans ce contexte, les unités de production d'énergie à base de biomasse trouvent naturellement leur place, répondant ainsi à des attentes environnementales et sociétales fortes exprimées par le Grenelle Environnement.

L'akène de tournesol : source d'huile, de protéines et de biomasse

La « graine » de tournesol (figure 1) n'est pas une graine au sens botanique du terme, mais un akène constitué d'une coque (péricarpe) renfermant une amande (endocarpe). Un fin tégument blanchâtre (testa) situé à l'interface entre l'amande et la coque sépare ces dernières en adhérent plus ou moins à l'une et/ou l'autre de ces deux fractions. La graine du tournesol oléagineux, de couleur uniformément sombre, renferme une amande riche en huile et comporte une coque pouvant représenter de 20 à 29 % de la masse totale de la graine (Grompone, 2005 ; Dreher *et al.*, 1983). La composition sur matière sèche (MS) des fractions de la graine rapportée dans le tableau 1 révèle de très nettes différences de composition entre ces dernières. L'amande est principalement constituée d'huile et de protéines, alors que la coque est principalement constituée de fibres et renferme très peu de protéines et de

Tableau 1. Composition des fractions de la graine du tournesol oléagineux et de l'amande déshuilée (d'après Grompone, 2005).

Composition	Coques pures	Amandes pures	Amandes pures déshuilées
Matières grasses brutes	3 %	67 %	1 %
Matières azotées totales	3 %	21 %	63 %
Cellulose brute	61 %	3 %	9 %
Extractif non azoté	31 %	6 %	19 %
Matières minérales	3 %	3 %	8 %

matières grasses. Par ailleurs, il convient également de noter la richesse en silicium de la fraction coque (de l'ordre de 340 mg/kg MS). Très abrasive, cette dernière peut être responsable d'une usure accélérée du matériel au contact. En outre, la matière grasse présente dans la coque à hauteur de 3 % est constituée d'une fraction non négligeable d'acides gras à très longues chaînes (Earle *et al.*, 1968), ainsi que de cires pour 0,5 % de la masse des coques (Bazus *et al.*, 1992).

Principalement constituées de cellulose et très pauvres en matières azotées et en eau, les coques de tournesol (figure 2) constituent une biomasse particulièrement intéressante en valorisation énergétique. La composition en fibres des coques (cellulose, pentosanes et lignine) se rapproche de celle de la paille de blé ou de la bagasse de canne à sucre mais se démarque par une proportion légèrement plus élevée de lignine (Earle *et al.*, 1968) et par sa richesse en silice. Le pouvoir calorifique inférieur des coques mesuré sur matière sèche (PCI anhydre) est de l'ordre de 18 000 kJ/kg (5 000 kWh/t), soit un PCI anhydre équivalent à celui généralement mesuré sur les bois (Demir *et al.*, 2005). Toutefois, l'humidité des coques de tournesol (12 à 14 %) est bien plus faible et moins variable que celle des bois. Dans la mesure où l'humidité pénalise fortement le PCI, les coques

disposent donc d'un net avantage au niveau du PCI mesuré sur brut.

Ainsi, la graine de tournesol constitue non seulement une source d'huile et de protéines, mais également d'énergie sous forme de biomasse dès lors que le trituteur dispose d'un atelier de décortiquage et d'une chaudière adaptée. Dans ce cas, la biomasse est de fait approvisionnée simultanément à la matière première car elle constitue elle-même l'un des coproduits générés par le site (cas de figure comparable à celui de l'utilisation de la bagasse en sucrerie). Ceci constitue un avantage non négligeable sur le plan logistique dans la mesure où l'approvisionnement en biomasse ne nécessite pas de filière d'approvisionnement ni de stockage spécifiques, et ne requiert pas la mise en place d'une expertise commerciale spécifique. En outre, la séparation des coques contribue à concentrer significativement les protéines dans les tourteaux, qui sont ainsi bien mieux adaptés aux besoins en protéines des filières animales (Borredon *et al.*, 2011). Toutefois, la gestion des excédents de coques éventuels doit être anticipée par l'industriel. La rentabilité du décortiquage repose ainsi sur un équilibre entre la valeur ajoutée du tourteau concentré en protéines, le prix du tourteau non décortiqué, et le prix de la biomasse.

Intégration industrielle du décortiquage et d'une chaudière biomasse

L'intégration d'un atelier de décortiquage de tournesol (figure 3) présente plusieurs avantages dans la conduite de l'huilerie. En effet, la séparation des coques du flux principal diminue considérablement le volume de matière à triturer et augmente donc la capacité de l'usine en proportion. Débarrassée d'une partie des coques, cette matière est également beaucoup moins abrasive pour le matériel et on peut s'attendre à une diminution des frais de maintenance et de la consommation électrique en aval, en particulier au niveau des aplatisseurs, des presses à huile mais aussi des presses à granuler (Laisney, 1984).

La graine de tournesol propre est généralement éclatée au moyen d'un décortiqueur centrifuge à impacts visant à briser le plus possible de coques en gros fragments, de façon à les séparer des amandes tout en limitant au maximum la production de fines au cours de l'opération. Le mélange obtenu est ensuite tamisé pour séparer les fines et graines décortiquées des plus grosses particules qui demeurent sur le tamis. La faible densité apparente des coques (0,1) au regard de celle du mélange de graines décortiquées (0,4) permet de séparer les coques par aspiration au cours du tamisage. À l'issue de cette opération, les plus grosses particules demeurant sur le tamis sont généralement des graines non décortiquées qui sont bien souvent recyclées en amont des décortiqueurs (figure 4).

Les coques constituent un combustible particulièrement intéressant non seulement pour leur PCI élevé mais également du fait de la relative stabilité de leur qualité en sortie du décortiquage. Cependant, les coques produites par l'atelier de décortiquage peuvent représenter un volume très important compte tenu de leur faible poids spécifique en sortie du décortiquage (100 kg/m³). Avec un taux de production de coques de l'ordre de 15 % en masse de la graine mise en œuvre, une tonne de graine d'un volume de l'ordre de 2,3 m³ génère de l'ordre de 2,2 m³ de graine décortiquée et 1,5 m³ de coques : soit 1 500 m³ par millier de tonnes de graine travaillée. En outre, la manipulation et la transformation des

Figure 2. Coques de tournesol (entières) issues du décortiquage du tournesol oléagineux : © Cédric Helsly.

Figure 3. Intégration d'un décortiquage en trituration.

Figure 4. Organisation d'un atelier de décortiquage type.

coques présentent des difficultés importantes compte tenu de leur faible densité, ainsi que leur haute teneur en fibres et en silicium (Beal *et al.*, 1981).

En dépit de leur intérêt manifeste en tant que biomasse, les coques sont donc bien souvent valorisées directement sur site. Sur le plan économique, il s'agit malgré tout de la meilleure valorisation attendue dans la mesure où le prix de valorisation énergétique est relativement élevé et directement corrélé au prix de l'énergie de substitution (bien souvent le gaz).

Selon les besoins en énergie thermique du site, la consommation locale de biomasse peut ainsi représenter de 30 à 100 kg de coques par tonne de graine triturée, voire davantage en cas de production d'électricité par turbinage. Toutefois le taux de coques à produire est susceptible de varier fortement pour s'adapter à la qualité des graines triturées afin de pouvoir garantir le taux de protéines désiré sur le tourteau. Si les besoins en coques du site demeurent

constants, l'excédent de biomasse disponible pour un marché externe sera donc variable dans le temps en fonction de la qualité des graines : la gestion des excédents de coques, dont la densité est très faible, devient alors un exercice ardu pour l'industriel.

Technologies pour une combustion optimale des coques

Il existe une grande variété de technologies de chaudières biomasse (chaudière sur grilles, à lit fluidisé, etc.) plus ou moins bien adaptées à la combustion de cette dernière selon ses caractéristiques. Les coques de tournesol constituant une biomasse relativement sèche (humidité inférieure à 15 %), et dont la granulométrie est fine (jusqu'à 20mm de diamètre), les chaudières à chambre cyclonique constituent une solution particulièrement adaptée à leur valorisation en production de vapeur.

La chambre cyclonique installée par les sociétés SIL et Berkes (*figure 5*) et exploitée depuis plus de 30 ans en Amérique du Sud, constitue une évolution des fours cycloniques autrefois employés pour la combustion du charbon. Cette dernière consiste en un cylindre horizontal connecté à la chaudière proprement dite au moyen d'un

étranglement conique. L'air alimentant la combustion est envoyé dans la chambre tangentiellement à la paroi de cette dernière et circule en tourbillonnant le long de la paroi, créant une couche limite au sein de laquelle les coques sont introduites. Sous l'effet de ce courant circulaire, les coques progressent au sein de la chambre selon une trajectoire en spirale en direction de l'étranglement conique. Ce dernier a pour effet de refouler dans le flux d'air cyclonique les particules de trop grande dimension, partiellement brûlées, de façon à ne permettre la sortie dans l'axe de la chambre qu'à de très petites particules peu soumises à la force centrifuge et se trouvant à un stade de combustion très avancé. En conséquence, le temps de séjour des particules combustibles dans la chambre se trouve augmenté de plus de 60 fois par rapport à un flux linéaire de chaudière à grilles et s'adapte à l'avancement de la combustion de chaque particule. La chaudière génère ainsi très peu d'imbrûlés et atteint un haut rendement de combustion comparable à ceux de chaudières à gaz.

La chambre elle-même étant constituée de tubes d'acier dans lesquels circule de l'eau, sa conception nécessite très peu de matériaux réfractaires dans la mesure où elle exploite la forte chaleur latente de vaporisation de l'eau. Ceci présente

le double avantage d'améliorer significativement les performances de la chaudière en limitant les pertes de chaleur, et d'isoler efficacement le foyer. La chambre cyclonique est associée à une chaudière de récupération d'énergie valorisant la chaleur des gaz de combustion sortant de la chambre (*figure 6*). Réactive et flexible en matière de taux de charge (de 60 % à 100 %), la chambre cyclonique s'avère une solution très adaptable pour des puissances allant de 750 kW à 30 MW selon le dimensionnement des installations.

Particulièrement adaptée à la valorisation de coques, cette technologie présente de nombreux avantages au regard d'autres technologies disponibles. Le faible excès d'air requis par la chaudière (environ 6 %) et le haut rendement atteint réduisent l'importance des besoins en traitement des fumées et les fréquences de nettoyage et d'entretien de la chaudière. Très blanches, les cendres présentent très peu d'imbrûlés et ne nécessitent pas d'être humidifiées, ce qui contribue à limiter les consommations d'eau et l'impact environnemental, tout en facilitant leur valorisation.

La chaudière émet cependant les rejets caractéristiques et prévisibles des chaudières à biomasse, bien qu'en quantité limitée au regard d'autres types de foyer. La combustion de coques de tournesol émet moins de SOx et de NOx que des combustibles liquides de référence, mais tend à émettre des quantités de poussières supérieures pouvant nécessiter des traitements spécifiques tels des électrofiltres ou filtres à manche (Demir *et al.*, 2005).

Des installations sensibles à la variabilité de l'intrant

Si la technologie de la chambre cyclonique admet une variabilité importante dans les caractéristiques des coques valorisées, l'industriel se doit de demeurer néanmoins très vigilant par rapport à la qualité des coques. L'intégration d'un décorticage modifie profondément la conduite d'une unité de trituration. Ainsi, l'atelier de décorticage constitue bien souvent le goulot d'étranglement qui détermine le fonctionnement du reste de l'unité. En particulier, un ajustement régulier du taux de

Figure 5. Schéma de principe de la chambre cyclonique (reproduit avec l'aimable autorisation du partenariat SIL/Berkes).

Figure 6. Chaufferie à coques du site SAIPOL de Lezoux (France) : © Cédric Helsly.

décorticage rendu nécessaire pour s'adapter à la variabilité de la graine travaillée afin de garantir les spécifications des produits modifie la répartition des flux au sein de l'unité et impacte les tonnages produits et rendements matières à différents niveaux, ce qui introduit un degré de complexité supplémentaire dans le fonctionnement de l'unité et la gestion des flux logistiques.

Un taux de décorticage poussé au niveau de l'atelier de décorticage/

séparation augmente le risque de perte d'amandes dans les coques sous forme de fines et de brisures, dégradant très rapidement le bilan de l'extraction et la rentabilité globale de l'activité (Laisney, 1984). L'augmentation de la vitesse de rotation d'un décortiqueur permet en effet d'augmenter le taux de décorticage, mais s'accompagne d'une augmentation de la proportion de fines d'amandes générées lors de l'opération (Subramanian *et al.*, 1990). Au niveau de la séparation, une augmentation de la proportion de coques séparées

s'accompagne également d'une élévation de la proportion de brisures d'amandes dans le flux de coques : il appartient donc à l'industriel de prévenir toute dérive et de déterminer un équilibre optimal entre le taux de décorticage et le taux de récupération des amandes en fonction de ses objectifs (Tranchino *et al.*, 1984). La présence de fragments d'amandes dans les coques doit être évitée : l'huile induirait alors un risque de formation d'acroléine par décomposition thermique de la matière grasse, et entraînerait également une température de combustion beaucoup plus importante dans le foyer pouvant endommager la chaudière, particulièrement l'instrumentation et les matériaux réfractaires. La présence simultanée de protéines dans la chaudière présenterait aussi un risque d'émission de substances indésirables dans les fumées : oxydes d'azote (NOx) et composés organiques volatiles (COV).

Un taux de décorticage faible augmente le risque de dévaloriser le tourteau dans la mesure où un tourteau de tournesol trop faiblement concentré en protéines pourrait être considéré principalement comme une source de fibres et non de protéines, lui faisant perdre beaucoup de son intérêt en nutrition animale, tout particulièrement chez les animaux monogastriques (Borredon *et al.*, 2011 ; Perez *et al.*, 1986). Or, une bonne valorisation économique du tourteau demeure indispensable à la rentabilité globale d'une installation de décorticage et de combustion de biomasse.

Il est donc crucial pour l'industriel de déterminer une spécification du tourteau en adéquation avec les besoins de ses clients et la gestion des excédents de coques, et de demeurer vigilant sur le taux de décorticage afin de garantir cette spécification en toutes circonstances tout en minimisant les pertes d'amandes dans les coques.

La maîtrise de la qualité des matières premières : un enjeu majeur

La variabilité de la composition et des caractéristiques de la graine est importante (Dreher *et al.*, 1983 ; Denis et Vear, 1994). De ce point de vue, la maîtrise de la variabilité de la graine constitue un enjeu majeur dans la mesure où de nombreux facteurs peu-

vent impacter les performances du décortiquage ou de la séparation. Les corrélations entre l'aptitude au décortiquage des graines et leurs autres caractéristiques ont été largement étudiées. L'aptitude au décortiquage augmente généralement avec la taille des graines (Dedio, 1993 ; Denis *et al.*, 1994b ; Denis et Vear, 1996 ; Nel, 2001, Subramanian *et al.*, 1990), mais elle diminue avec la densité de la graine (Dedio et Dorell, 1989 ; Dedio, 1993 ; Tranchino *et al.*, 1984). Dedio et Dorell (1989) considèrent qu'une épaisseur de 3,2 à 4 mm constitue un bon compromis entre aptitude au décortiquage et facilité de manutention. Tranchino *et al.* (1984) rapportent que le décortiquage devient difficile au-delà d'une densité apparente de 0,4 kg/L : une faible densité traduit l'existence d'un vide entre l'amande et la coque qui facilite le décortiquage. La teneur en humidité constitue ainsi un facteur important : les graines sèches se décortiquant plus facilement du fait d'une plus grande rigidité de la coque qui devient cassante (Sharma *et al.*, 2009) et du décollement de l'amande lors de son séchage (Gupta et Das, 1999 ; Nel, 2001 ; Subramanian *et al.*, 1990 ; Tranchino *et al.*, 1984). L'aptitude au décortiquage augmente également avec la teneur en coques de la graine (Dedio, 1993 ; Denis et Vear, 1996 ; Pritchard, 1983), toutefois elle diminue avec sa teneur en huile (Dedio et Dorell, 1989 ; Dedio, 1993 ; Denis *et al.*, 1994b. Denis et Vear, 1996 ; Nel, 2001). Cependant,

Denis et Vear (1994a) suggèrent que l'observation au microscope optique des tissus de graines de tournesol pourrait permettre d'identifier des génotypes présentant une bonne aptitude au décortiquage et combinant teneur en huile élevée et teneur en coques faible, ces variétés pouvant présenter un intérêt non négligeable en amélioration variétale.

En huilerie, on retiendra également l'importance d'une faible teneur en impuretés des lots commerciaux, l'impact négatif de la présence d'impuretés se trouvant amplifié dans le cadre de l'exploitation d'un décortiquage dans la mesure où les impuretés sont fortement concentrées dans le tourteau. Les impuretés diminuent la teneur en protéines du tourteau et augmentent sa teneur en fibres. En outre, la présence de graines toxiques et réglementées telles que *Datura sp.* (JOUE, 2011) constitue un risque sanitaire. À ce titre, il n'est pas inutile de rappeler que l'Addendum technique n° VI des formules INCOGRAIN (Syndicat de Paris, 1999), stipule que la norme en matière d'impuretés est fixée à 2 %, les lots étant toutefois refusables au-delà de 5 %. On constate en effet malgré tout que les teneurs en impuretés peuvent excéder régulièrement la norme de 2 %. Au vu de l'ensemble des caractéristiques considérées, le *tableau 2* reprend les principales caractéristiques recherchées dans le cadre du décortiquage du tournesol en huilerie.

En ce qui concerne l'aptitude au décortiquage, les facteurs pédoclimatiques et les itinéraires culturaux sont prédominants sur le facteur génétique (Dedio et Dorell, 1989 ; Denis *et al.*, 1994c ; Nel, 2001). En outre, les interactions génotype × milieu peuvent être importantes et variables, en particulier en présence d'un stress hydrique (Dedio et Dorell, 1989 ; Denis et Vear, 1994).

Une amélioration en filière

La variabilité importante de la graine requiert la mise au point de solutions techniques à différents niveaux permettant de la lisser et d'en limiter les conséquences chez le triturateur. Elle passe ainsi nécessairement par une démarche coordonnée et déclinée aux différents niveaux de la filière de valorisation : allant de l'acquisition de connaissances relatives à la biologie du tournesol jusqu'à l'utilisation des produits, en passant par un effort en matière d'amélioration des variétés, mais également des pratiques agricoles, de travail du grain, et des technologies mises en œuvre.

Denis et Vear (1994) mettent en évidence que l'aptitude au décortiquage constitue un caractère présentant une bonne héritabilité et stabilité sur les populations étudiées, suggérant d'envisager plus largement l'étude de l'aptitude au décortiquage en sélection pour

Tableau 2. Caractéristiques des graines de tournesol présentant un intérêt dans le cadre d'une trituration avec décortiquage.

Critère	Objectif	Justification
Teneur en huile sur matière sèche propre	Maximiser	Améliorer la marge de trituration constituée en grande partie du revenu lié à l'huile
Teneur en protéines sur matière sèche propre délipidée	Maximiser	Améliorer la valorisation de la graine et du tourteau. La teneur en protéines doit être envisagée sous l'angle de la matière sèche délipidée , et non de la matière brute ou de la matière sèche (confusion d'effet avec la teneur en huile menant à corrélation négative biaisée)
Teneur en humidité	4 à 8 %	La norme figurant à l'Addendum Technique de l'INCOGRAIN (Syndicat de Paris, 1999) est fixée à 9 %, mais l'humidité optimale pour un décortiquage avoisine les 5 % (Tranchino <i>et al.</i> , 1984 ; Gupta et Das, 1999), pouvant justifier la mise en place d'un séchage complémentaire chez le triturateur.
Teneur en impuretés	Minimiser	La norme figurant à l'Addendum Technique de l'INCOGRAIN (Syndicat de Paris, 1999) est fixée à 2 %, les lots étant toutefois refusables à 5 %. Les impuretés pénalisent fortement la teneur en protéine des tourteaux.
Densité apparente	< 0,4 kg/L	(Tranchino <i>et al.</i> , 1984) Existence d'un vide entre la graine et l'amande. Toutefois, il est nécessaire de trouver un compromis avec les aspects logistiques.
Taille de la graine	3,2 à 4 mm d'épaisseur	Dedio et Dorell (1989) considèrent qu'il s'agit du compromis optimal entre aptitude au décortiquage et aspects logistiques.

confirmer ces résultats. Il semble que l'aptitude au décortilage puisse être améliorée à terme au moyen de méthodes classiques pour peu qu'un effort soit mené sur l'identification de lignées présentant par exemple simultanément de fortes teneurs en huile et une bonne aptitude au décortilage (Denis et Vear, 1994 ; Nel, 2001). Denis et Vear (1996) démontrent ainsi qu'une sélection est pertinente et envisageable sur l'aptitude au décortilage, et proposent des stratégies de sélection pour y parvenir.

Compte tenu de l'importance du facteur pédoclimatique, on ne saurait trop insister sur le rôle prépondérant de conduites culturales mieux adaptées et d'une meilleure connaissance des milieux de culture. Il existe à ce titre un potentiel de progression important, défi que la filière française est à même de relever du fait de son organisation (Jouffret *et al.*, 2011). Les conduites actuelles peuvent en effet être largement améliorées, en particulier selon les pistes identifiées par Jouffret *et al.*, (2011). En matière de pratiques de récolte et de travail du grain, il existe certainement une marge de progression pour une meilleure gestion des impuretés (Borredon *et al.*, 2011). En particulier, la hauteur élevée de la barre de coupe et un réglage approprié de la batteuse et des nettoyeurs chez l'organisme stockeur devraient permettre d'assurer sans pertes significatives de très faibles teneurs en impuretés sur tournesol (Pritchard, 1983).

Conclusion

Les progrès significatifs en matière de technologie de chaudière ont suscité un nouvel intérêt pour le décortilage et la valorisation énergétique des coques avec le renchérissement de l'énergie et des attentes sociétales fortes. Les chaudières disponibles sont aujourd'hui performantes et le décortilage en huilerie présente de nombreux atouts pour l'ensemble de la filière : autonomie et maîtrise des coûts énergétiques, impact environnemental réduit, amélioration de la valeur intrinsèque des produits (tourteaux et huiles), limitation de la dépendance en énergie et protéine, intérêt accru pour le tournesol.

Toutefois, le fait d'implanter ces nouveaux ateliers introduit des changements importants dans la conduite de

l'huilerie et en particulier dans la gestion de la variabilité de la graine. Ces ateliers posent ainsi de nouveaux défis devant être traités non seulement chez le tritrateur au moyen de choix technologiques adaptés, mais également en amont : métier du grain, itinéraires culturaux, connaissance de la biologie du tournesol, des milieux de culture, et sélection variétale. La compétitivité d'une stratégie de décortilage dépend des choix techniques effectués en amont, impactant l'aptitude de la graine à être valorisée et sa variabilité. En outre, la viabilité de l'activité doit être raisonnée dans son ensemble car elle dépend de sa capacité à répondre non seulement à un besoin énergétique, mais également aux attentes des filières de nutrition animale. La détermination du taux de décortilage optimal permettant valorisation des tourteaux et gestion des excédents de coques est à ce titre un point crucial du succès de stratégies de décortilage. Or, si des technologies de combustion performantes sont disponibles et si le potentiel de valorisation énergétique des coques est aujourd'hui bien connu, de nombreuses incertitudes demeurent encore sur le potentiel de valorisation des tourteaux selon les taux de décortilage pratiqués.

Remerciements. Les auteurs remercient les collaborateurs SAIPOLE de Lezoux et Bassens pour leur contribution, ainsi que les sociétés SIL/Berkes/De Smet engineers et Contractors pour leur support à la rédaction de cet article et leur aimable autorisation pour la reproduction de la figure 5.

Conflits d'intérêts : Sylvain Tostain, Pierre Chervier, Alain Lulan et Thomas Kermorgant sont salariés de la société SAIPOLE.

RÉFÉRENCES

Bazus A, Rigal L, Gaset A. Valorisation des coques de tournesol : bilan et perspectives : mise au point. *Rev Fr des Corps Gras* 1992 ; 39 : 345-50.

Beal L. Valorisation des sous-produits de l'industrie des corps gras -II- Les coques de tournesol. *Rev Fr des Corps Gras* 1981 ; 4 : 56-7.

Borredon ME, Berger M, Danguet S, *et al.* Débouchés actuels et futures du tournesol produit en France – Critères de qualité. *Innovations Agronomiques* 2011 ; 14 : 19-38.

Dedio W. Regression model relating decortication of oilseed sunflower hybrids with

achene characteristics. *Can J Plant Sci* 1993 ; 73 : 825-8.

Dedio W, Dorell DG. Factors affecting the hullability and physical characteristics of sunflower achenes. *Can Inst Food Sci Technol J* 1989 ; 22 : 143-6.

Demir G, Nemlioglu S, Yazgic U, Dogan EE, Bayat C. Determination of some important emissions of sunflower oil production industrial wastes incineration. *J Sci Ind Res* 2005 ; 64 : 226-8.

Denis L, Coelho V, Vear F. Pericarp structure and hullability in sunflower inbred lines and hybrids. *Agron Sustainable Dev* 1994a ; 14 : 453-61.

Denis L, Dominguez J, Baldini M, Vear F. Genetical studies of hullability in comparison with other sunflower seed characteristics. *Euphytica* 1994b ; 79 : 29-38.

Denis L, Dominguez J, Vear F. Inheritance of 'Hullability' in Sunflowers (*Helianthus annuus* L). *Plant Breeding* 1994c ; 113 : 27-35.

Denis L, Vear F. Environmental effects on hullability of sunflower hybrids. *Agron Sustainable Dev* 1994 ; 14 : 589-97.

Denis L, Vear F. Variation of hullability and other seed characteristics among sunflower lines and hybrids. *Euphytica* 1996 ; 87 : 177-87.

Dreher ML, Roath WW, Holm ET, D'Appolonia B. Yield, Characteristics and Composition of Oil-Type Hybrid Sunflower Seed Grown in North Dakota. *J Am Oil Chem Soc* 1983 ; 60 : 1876-7.

Earle FR, Vanetten CH, Clark TF, Wolff IA. Compositional data on sunflower seed. *J Am Oil Chem Soc* 1968 ; 60 : 1876-7.

Grompone MA. Sunflower oil. In : Shahidi F (Ed.), *Bailey's industrial Oil and Fat Products* 6th ed (Volume 2 : Edible Oil and Fat Products : Edible Oils). Hoboken (USA) : John Wiley & Sons, Inc., 2005.

Gupta RK, Das SK. Performance of centrifugal dehulling system for sunflower seeds. *J Food Eng* 1999 ; 42 : 191-8.

JORF du 05/08/2009. Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.

JORF du 13/07/2010. Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement.

JOUE du 17/06/2011, série L, n° 159/7, version française. Règlement N° 574/2011 de la Commission du 16 juin 2011 modifiant l'annexe I de la directive 2002/32/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les teneurs maximales applicables au nitrite, à la mélamine, à *Ambrosia* spp. et au transfert de certains coccidiostatiques et

histomonostatiques, et établissant une version consolidée de ses annexes I et II.

Jouffret P, Labalette F, Thibierge J. Atouts et besoins en innovations du tournesol pour une agriculture durable. *Innovations Agronomiques* 2011 ; 14 : 1-17.

Laisney J. *L'Huilerie Moderne*. Paris : Compagnie Française pour le Développement des fibres Textiles, 1984.

Nel AA. Determinants of sunflower seed quality for processing (Thèse). Pretoria (Afrique du Sud) : Faculty of Natural and Agricultural Sciences, 2001.

Perez JM, Bourdon D, Baudet JJ, Evrard J. Préviation de la valeur énergétique des tourteaux de tournesol à partir de leurs teneurs en constituants pariétaux. *Journées de la recherche porcine* 1986 ; 18 : 35-46.

Pritchard JR. Oilseed Quality Requirements for Processing. *J Am Oil Chem Soc* 1983 ; 60 : 275A-84A.

Sharma R, Sogi DS, Saxena DC. Dehulling performance and textural characteristics of unshelled and shelled sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds. *J Food Eng* 2009 ; 92 : 1-7.

Subramanian R, Shamanthaka Satry MC, Venkateshmurthy K. Impact dehulling of sunflower seeds : Effect of operating conditions and seed characteristics. *J Food Eng* 1990 ; 12 : 83-94.

Syndicat de Paris du commerce et des industries des grains. Addendum technique n° VI pour la vente des graines oléagineuses de colza et de tournesol originaires de la CEE, 1999.

Tranchino L, Melle F, Sodini G. Almost complete dehulling of high oil sunflower seed. *J Am Oil Chem Soc* 1984 ; 61 : 1261-5.