



# **BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE ET SYSTEMES INTENSIFS DURABLES**

**MISE A JOUR BIBLIOGRAPHIQUE DU 15/12/2007**

*Denis Pouzet\**  
*Marie Galante, Janvier 2008*

*Distillerie  
Bielle*

*Tas de  
bagasse  
non utilisé par  
la distillerie*



*Brulis  
post récolte*

*Biomasse  
Résiduelle  
et  
élevage*

*Biomasse résiduelle après récolte*

*Marie Galante, Clichés D. Pouzet*

**CIRAD PERSYST, UR5 « systèmes caniers »**

\* Agronome, CIRAD, [denis.pouzet@cirad.fr](mailto:denis.pouzet@cirad.fr)



**TABLE DES MATIERES**

<i>Résumé</i> .....	5
<i>Enjeux</i> .....	7
<i>L'intensification</i> .....	7
<i>Place de la lignocellulose</i> .....	7
<i>La technologie</i> .....	7
<i>Evolution actuelle</i> .....	7
<i>Conséquences pour la recherche</i> .....	8
<i>Les conflits d'usage</i> .....	8
<i>Contexte et enjeux scientifiques</i> .....	9
<i>Introduction</i> .....	9
<i>Choix des cultures</i> .....	9
<i>Choix variétaux</i> .....	10
<i>Point des recherches</i> .....	10
<i>Positionnement opérationnel</i> .....	11
<i>La culture</i> .....	12
<i>Age et milieu</i> .....	12
<i>Intrants</i> .....	12
<i>Mécanisation et procédés industriel</i> .....	12
<i>Economie et coûts de production</i> .....	13
<i>Conséquences pour la recherche</i> .....	14
<i>Principaux documents consultés</i> .....	15
<i>Annexe : Quelques usages de la biomasse en cours de développement</i> .....	18
<i>Introduction</i> .....	18
<i>Biomasse brute</i> .....	18
<i>Raffinage</i> .....	19



## Résumé

La biomasse utile correspond à l'ensemble de la partie récoltable des plantes. Constituée majoritairement d'hydrates de carbone provenant de l'assimilation photosynthétique du CO<sub>2</sub> elle est renouvelable à l'échelle du cycle de culture. Cette caractéristique mise en avant par les problématiques de réchauffement climatique et de diminution des ressources en énergie fossile est cependant contrainte par le processus de production. Celui-ci consomme en effet de l'énergie fossile (ciment des bâtiments, métaux constitutifs des engins, carburant..) et interagit avec le milieu pour générer d'importantes quantités de Gaz à Effet de Serre (CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>v</sub>). Le volume de GES dépend notamment de la biologie du sol (matière organique, humidité...) et des itinéraires techniques (labour, paillage, façons culturales, gestion des résidus, type et dose d'engrais, irrigation...). Cette approche comptable autour du CO<sub>2</sub> néglige cependant les rôles essentiels et multiples des végétaux, dont la production d'oxygène.

Principal constituant de la biomasse, la lignocellulose est la partie la plus abondante et la moins utilisée des productions agricoles. Elle constitue un « diluant » préjudiciable aux performances des agrosystèmes intensifs dédiés à des utilisations mono-composantes (glucide, lipide ou protide). Les spécialistes considèrent que 50% de la biomasse produite reste inutilisée, toute culture confondue. La sélection contribue à en réduire la production et limite de fait le potentiel photosynthétique des variétés élites. Les recherches technologiques sur la valorisation de cette lignocellulose sont au stade pilote. Des projets d'unités industrielles rentables sont planifiés dans de nombreux pays pour la décennie à venir. La faible pression de sélection sur la biomasse totale ou la production de ligno-cellulose (fibre) permet de prévoir des accroissements de productivités rapides et très importants par la sélection et la création variétale. La sélection doit ainsi porter sur la production totale en s'éloignant progressivement des critères basés sur le fonctionnement des usines actuelles.

Les Poacées tropicales en C4 présentent les meilleurs potentiels photosynthétiques des plantes cultivées. Les Poacées alimentaires (mil, sorgho, maïs...) ne sont pas prioritaires dans notre approche du fait de leur cycle court et de leur multiplication par graine. Nous nous intéressons surtout, pour des raisons économiques et environnementales aux Poacées pérennes multipliées généralement par voie végétative. La culture de référence, très étudiée et productive est la canne à sucre et par extension les espèces inter-fertiles du groupe Saccharum (Eryanthus, Miscanthus, Spontaneum...). Des fourrages comme le Pennisetum purpureum font aussi partie des plantes à très haut potentiel.

La biomasse lignocellulosique est un élément essentiel de l'évolution vers une agriculture **intensive et durable** qui reste aujourd'hui à concevoir. La recherche agronomique doit en effet réunir deux notions a priori incompatibles qui font référence d'une part à la monoculture à forte consommation d'intrants qui porte préjudice à l'environnement et d'autre part à l'agriculture biologique qui est dans l'impossibilité de répondre à des besoins alimentaires urbains de masse. Notre thèse s'appuie sur les faits suivants :

- L'utilisation de toute la biomasse récoltable double pratiquement la production des Poacées qui nous intéressent sans modifier les systèmes en place. Elle accroît directement la quantité utile de CO<sub>2</sub> capté.
- Le potentiel de production peut être rapidement et largement accru en faisant porter la sélection sur la biomasse totale.
- Les composantes de la biomasse lignocellulosique sont des polymères de molécules de base de l'alimentation énergétique humaine (glucides, polysaccharides, amidon...). Ils constituent une source pour l'agrochimie alimentaire incontournable lorsqu'il s'agit de satisfaire une alimentation humaine de masse. Ils participent par ailleurs directement à la production de protéines animales.
- Les utilisations multiples de la biomasse garantissent une meilleure valorisation économique de la production.

Cette note destinée à être annexée à nos projets comme justificatif scientifique (caractère confidentiel) est une mise à jour bibliographique des pistes de recherche agronomique pour valoriser le potentiel photosynthétique des cultures et l'adapter aux usages. Nos propositions portent sur la sélection des cultures et des variétés et la modélisation de l'évolution des composantes de la biomasse lignocellulosique au cours du cycle. Des connaissances sont à acquérir dans les domaines du déterminisme génétique des composantes de la lignocellulose, de la physiologie de leur synthèse et des interactions génotype environnement.



## **Enjeux**

### **L'intensification**

L'agriculture doit s'intensifier pour assurer l'alimentation humaine dans un contexte mondial marqué par une diminution de la surface agricole utile par habitant et la raréfaction des facteurs de production (eau, engrais notamment phosphatés). Elle doit aussi réduire sa large contribution au réchauffement climatique. Les consommations d'énergies fossiles de l'agriculture au travers de la mécanisation et des intrants sont importantes. Le processus de production agricole produit des GES : CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O<sub>v</sub>. Le Potentiel de Réchauffement Global (PRG) du méthane, souvent associé à l'élevage est de 23 (23 fois celui du CO<sub>2</sub>). Celui de l'oxyde nitreux qui dépend notamment de la fertilisation est de 296. La vapeur d'eau, en rapport avec l'irrigation a un PRG de 8. L'élevage émet à lui seul plus de GES que les transports et représente une source principale de dégradation des terres et des eaux (FAO, 26/11/06).

Il est donc aujourd'hui nécessaire de concevoir des systèmes de culture plus performants, avec une empreinte écologique réduite et un meilleur équilibre entre les usages alimentaires et industriels. Les solutions prévisibles sont une évolution des systèmes intensifs dédiés à une production particulière, vers des systèmes de polyculture, pour lesquels toute la production peut être valorisée.

L'intensification des systèmes passe aujourd'hui par l'optimisation du potentiel photosynthétique des cultures (capter un maximum de CO<sub>2</sub>/ha/an) et la valorisation de tout le CO<sub>2</sub> capté.

### **Place de la lignocellulose**

#### ***La technologie***

#### ***Evolution actuelle***

Les plantes et les cultures sont considérées depuis longtemps comme une ressource renouvelable « stratégique » (DOE/GO, 1998). Les recherches technologiques, notamment du NREL aux USA (Godshall, 2005) et du pôle de compétitivité IAR en France (IAR, 2007 ; ) développent le concept de bioraffinage de la production agricole. Le principe est la séparation et l'extraction de toutes les composantes de la plante pour les valoriser. La notion de déchet ou de sous produit disparaît. Cette évolution est inséparable de l'écodéveloppement (développement économique durable). La cible principale de ces recherches est la lignocellulose. C'est en effet la partie la moins utilisée et la plus massive de la production agricole. Cette valorisation de la totalité de la production ouvre la voie à la durabilité économique des systèmes. L'usage multiple qui peut être fait de la production est une garantie contre les fluctuations de la composante économique principale. Les usages secondaires augmentent la valeur de la production. Ainsi, pour la canne à sucre, le bioraffinage est considéré aujourd'hui comme un facteur essentiel de la durabilité de l'industrie du sucre (Edye L. A. et al. 2006).

De nouvelles applications industrielles, associées à l'utilisation de la lignocellulose, sont annoncées dans des délais courts (annexe). La littérature scientifique et technique mentionne de nombreux dépôts de brevets, des unités pilotes de nouveaux projets industriels, de nouvelles recherches. Des « effets d'annonces » sont cependant identifiables dans ce domaine très concurrentiel. Il convient donc d'analyser les informations avec prudence pour ne pas confondre intention et réalisation.

La séparation et la valorisation des principales composantes de la lignocellulose sont actuellement limitées par les coûts des procédés. Les économistes considèrent que la limite de valorisation des cultures provient du coût industriel et non pas de celui de la matière première. Les perspectives font état d'un niveau économique acceptable d'ici 5 ans. Ce délai est en particulier annoncé pour l'éthanol cellulosique (Knight, P., 2007) dont le prix de revient est aujourd'hui 5 fois plus élevé que celui de l'éthanol classique.

Notons qu'en dehors de la lignocellulose, il existe dans les plantes des molécules à forte valeur ajoutée provenant de métabolismes secondaires. Il s'agit cependant de production de « niche » qui ne nous intéresse pas ici.

## ***Conséquences pour la recherche***

Les usages potentiels de la lignocellulose sont multiples (alimentation du bétail, énergie, biocarburants, biomatériaux, chimie verte...). Ils sont associés à des composantes qualitatives spécifiques de la biomasse (lignine, cellulose, hémicellulose, azote...) ainsi qu'à ses caractéristiques (pouvoir calorifique, qualité des fibres...). La recherche agronomique doit adapter la biomasse produite à une demande qui sera orientée prioritairement vers l'usage économique principal et en second lieu vers les parts relatives des autres usages. Ces dernières ne doivent pas être marginalisées au risque de conduire à une dégradation du potentiel photosynthétique (voir § choix variétal). Le pas de production de résultats en matière de recherche agronomique étant au minimum de 5 ans (10 à 12 pour la création variétale), nous devons prévoir et précéder ces changements en élargissant rapidement nos recherches à l'ensemble des constituants de la plante. Cette stratégie est seule apte à faire coïncider la réponse de la recherche aux demandes prévisibles des industriels.

L'évaluation des composantes de la lignocellulose, de leurs caractéristiques n'est pas réalisable à partir des systèmes classiques d'analyse. Ceux-ci sont trop chers, et beaucoup trop longs à mettre en œuvre. Peu de laboratoires sont équipés pour ce type d'analyse. La solution est l'analyse par Spectrométrie dans le Proche InfraRouge (SPIR) que les éleveurs ont adopté et il est quasi généralisé pour les analyses de fibre (Kelley, S. et al., 2004). Les analyses sont immédiates et non destructives. Elles imposent cependant des calages coûteux (analyses d'environ 200 échantillons par les méthodes de routine). La préparation des échantillons nécessite un équipement des sites expérimentaux pour transformer des végétaux riches en fibres et en silice (cas général des Poacées) en matière sèche broyée de manière calibrée. Ils pourront être ensuite analysés à tout moment par tout SPIR disposant de la base de données de calage.

## ***Les conflits d'usage***

Les demandes actuelles en biomasse sont « pétrolo-dépendantes » et profitent sans vraiment l'intégrer de la problématique du réchauffement climatique. Elles reposent sur des besoins non alimentaires avec une très forte dominante bioénergétique. Elles sont associées à des filières mono-usage, des technologies vieillissantes et à un fort lobbying industriel. Les conséquences sont dommageables :

- L'intérêt environnemental mis en avant correspond le plus souvent à une dégradation. Il suffit de se rappeler que la filière éthanol des céréales du nord consomme plus d'énergie qu'elles n'en produisent et provoque une envolée des prix des matières premières alimentaires.
- Les surfaces dédiées à l'alimentation humaine sont en régression dans les pays du sud (canne à sucre, palmier à huile) mais aussi du nord (maïs, blé, oléagineux). Le phénomène contribue aussi à accélérer la déforestation (biodiésel au Brésil, accroissement des surfaces en palmier à huile en Malaisie et au Congo).

Ces évolutions créent des problèmes économiques et sociaux, liés à l'affectation de surfaces agricoles du sud pour des productions destinées aux pays du nord. Nous sommes cependant concernés par ces demandes puisqu'elles :

- Donnent accès au financement de nos recherches pour intensifier une production alimentaire ;
- Ouvrent les portes d'une collaboration avec l'industrie, collaboration qui devra devenir osmotique si l'on veut optimiser la production et modifier les critères de sélection au profit de la biomasse ;
- Permettent de jouer en amont sur l'empreinte écologique liée à la transformation agroindustrielle.

Les demandes du futur évoquées dans les paragraphes précédents, concourent à valoriser la partie lignocellulosique des plantes. Elles ne s'opposent pas aux objectifs alimentaires prioritaires du CIRAD. La lignocellulose est en effet à la base de la production de protéines alimentaires au travers de l'élevage. Elle est aussi après raffinage une source potentielle importante des



constituants énergétiques de notre alimentation (sucres, polysaccharides, amidon...), Ces constituants ouvrent de plus la voie à la synthèse de protéines et de lipides alimentaires. La valorisation de la lignocellulose à des fins non alimentaires à l'échelle des petites structures de production devrait contribuer à renforcer l'économie de la partie alimentaire de la production.

## **Contexte et enjeux scientifiques**

### **Introduction**

La production lignocellulosique des cultures a été très peu étudiée. Les principaux travaux sont relatifs à la canne à sucre et aux graminées fourragères. Les connaissances agronomiques sur les relations entre les conditions pédo-climatiques et la synthèse des carbohydrates de structure constituant l'essentiel de la biomasse sont fragmentaires et quasi limitées aux cultures fourragères.

### **Choix des cultures**

Le potentiel photosynthétique des cultures varie fortement en fonction des espèces. Les plus performantes, si l'on fait abstraction des algues, sont des plantes à cycle photosynthétiques en C4 (photorespiration réduite par rapport aux C3) et en particulier les Poacées, bien adaptées aux conditions tropicales. La canne à sucre a une efficacité photosynthétique de 2,24 à 2,59%. Le *Pennisetum purpureum* (elephant grass, sudan grass, tropical napier grass, canne fourragère...) atteint le taux record de 2,8% (Klass, D., 2004). Ces chiffres sont à comparer aux 0,79% du maïs et au 0,95% des espèces arbustives tropicales. Les Poacées en C4 comme le *Miscanthus le switchgrass* (*Pennisetum virgatum* ou panic érigé) ou le cordgrass (*Spartina* sp) des zones marécageuses (Boe A., Lee D.K., 2007) sont aussi parmi les cultures les plus performantes en conditions tempérées. Certaines Poacées en C3 comme la canne de provence (*Arundo donax*) ont un potentiel proche de celui des C4 (Christou et al. 2001). Les sorghos, dont le sorgho sucré adaptable et productif, ne figurent pas dans cette liste. Si leurs potentiels sont excellents, il s'agit, comme la plupart des céréales alimentaires (mils, maïs, riz...) de cultures à cycle court pouvant faire l'objet de plusieurs cycles de production dans l'année et sans aptitude à la repousse. Nous nous intéressons de préférence pour la biomasse, aux Poacées pérennes à multiplication végétative (cas le plus général pour les pérennes). Elles ont l'avantage d'un couvert qui se reforme de lui-même après récolte. Plantes à croissance continue qui ne fleurissent généralement pas, elles sont exploitables annuellement et permettent de très larges fenêtres de récolte. Les coûts élevés de plantation sont amortis sur plusieurs récoltes et les retours sur investissement débutent dès la première année. Ces Poacées pérennes présentent de nombreuses autres caractéristiques intéressantes, dont des qualités antiérosives et anti-adventices (couverture annuelle du sol, faible fréquence des labours). Ainsi, les espèces à croissance rapide comme la canne à sucre ou le switchgrass sont considérées comme des options économiques intéressantes pour la production de bioénergie (McLaughlin SB & al. 2002).

La canne à sucre est la plante modèle du groupe des Poacées pérennes. Elle est très étudiée, très productive et ses caractéristiques sont propres à améliorer la durabilité des systèmes de culture :

- Le sucre est l'un des constituants valorisables, qui s'ajoute à la valeur de la biomasse. Il peut, en fonction des procédés industriels retenus, améliorer l'intérêt économique de la production (par exemple éthanol / énergie ou éthanol de première et seconde génération) ;
- La culture ne nécessite pas de traitements phytosanitaires du fait d'une forte pression de sélection contre les maladies ;
- Ses besoins en herbicide sont limités car sa vitesse de couverture du sol après récolte est élevée. Les seuls problèmes importants sont la phase critique au moment de l'implantation (installation lente à partir de bouture) et les adventices lianescentes non contraints par la fermeture du couvert ;
- Les besoins minéraux de la canne à sucre rapportés à la biomasse produite sont faibles, notamment en matière d'azote (faible teneur en protéine de la plante) ;

- La canne résiste de manière remarquable à la toxicité aluminique propre aux sols acides. Le chaulage est rarement nécessaire et les apports calco-magnésiens peuvent être généralement limités aux seuls besoins trophiques ;
- La résistance du couvert aux cyclones ;
- Le renouvellement du système racinaire après chaque récolte, qui permet l'incorporation de 10% de la biomasse totale produite dans le profil de culture et constitue un véritable amendement organique.

Nous fondons de grands espoirs dans nos projets qui ne s'intéressent pas à la composante sucre dans les espèces sauvages du groupe *Saccharum* ainsi que dans les fourrages de type Pennisetum. Ces plantes ont une excellente productivité une pérennité très élevée et une capacité invasive qui limite les problèmes de culture à la phase d'implantation et aux modalités de récolte.

## Choix variétaux

### *Point des recherches*

Les études de génétique quantitative portant sur la canne à sucre, montrent une corrélation fortement négative (entre -0.65 et -0.76 selon les auteurs) entre la teneur en saccharose et la teneur en fibre (Sunil & Lawrence, 1996; Jackson, 1994; Brown et al. 1969). De nombreuses décennies de sélection guidées par des critères industriels (forte richesse en sucre, faible teneur en fibre et bonne pureté du jus) ont donc contribué à ne conserver que des cultivars à faible potentiel photosynthétique. Corollaire à cette situation, le potentiel d'amélioration demeure considérable. Ainsi, les recherches sur la lignocellulose, impulsées à la suite des chocs pétroliers, montrent une grande variabilité variétale de teneur en fibre lignocellulosique (Rao, P.S., 2007 ; Rao, P.S., Albert-Thenet, J.R., 2005; Albert-Thenet, J. R., and Rao, P., S., 2005; Rao, P. S. and Kennedy, A., 2004; De Andrade et al, 2004; Salas & al., 1992; Clarke, S. J., S.J., Keenlside, W., 1986; ; Alexander, A. G., 1985, 1979; Randa, M., Valdez, R.E., 1976 ). Le potentiel d'accroissement de la biomasse produite au travers de l'accroissement de la teneur en fibre est considérable comme le démontre les résultats obtenus en Floride sur l'hybride 1002 issu d'un croisement entre une canne noble (*Saccharum officinarum*) et une espèce sauvage originaire d'Argentine (Giamalva, M. J., 1986; Clarke, S.J.) :

<i>Rendement / composition</i> <i>Résultats moyens sur 5 récoltes</i>		<i>Commercial</i> <i>CP65-357</i>	<i>Hybride*</i> <i>SP79-1002</i>
<i>t/ha</i>	<i>Biomasse aérienne</i>	58	212
	<i>Tige usinable</i>	50	169
<i>Composition</i> <i>en % tige</i> <i>usinable</i>	<i>Fibre</i>	13,4	28,0
	<i>Soluble</i>	16,2	11,1
	<i>Saccharose</i>	14,0	8,4
	<i>Monosaccharide</i>	0,6	1,2
<i>Biomasse aérienne d'une canne Kg</i>		1,17	0,59
<i>Hauteur moyenne d'une canne m</i>		2,2	3,3
<i>Sucre théorique t/ha</i>		7	14,2
<i>Fibre théorique t/ha</i>		6,7	47,3

\* La production de l'hybride s'est accrue au fil des coupes alors qu'elle décroît pour la canne à sucre

Les cannes à sucre actuelles ont des teneurs en fibre inférieures à 15%. Les hybrides créés pour la fibre en Floride et à Barbade approchent les 30%. Les meilleurs géniteurs utilisés pour accroître les teneurs en fibre atteignent 59% (*S. spontaneum*). Les possibilités d'accroître la production de la plante entière (Lakshmanam, P. et al ; 2005) par des modifications génétiques restent, pour nos projets appliqués, du domaine de la veille scientifique plutôt que de l'intégration. Il faut cependant signaler les résultats saisissants publiés récemment en Australie (WU, L. and Birch, R.G., 2007). L'un des déficit actuels pour les monocotylédones porte sur le vecteur d'introduction des gènes qui conditionne le taux de réussite. Monsanto™ semble toutefois relever le déficit. Le groupe vient en effet de s'associer avec une entreprise brésilienne de biotechnologie (Allelix e CanaViallis de Votoratim Novo Negocio) pour créer des cannes transgéniques « Round

Up Ready » adaptées à la production d'éthanol de seconde génération (Gazeta Mercantil, 30/05/07).

La sélection par les voies traditionnelles (croisements spécifiques ou interspécifiques et critères de sélection) orientée vers une optimisation du potentiel photosynthétique est une voie évidence à moyen et long terme. Il s'agit de capter un maximum de CO<sub>2</sub>/ha/an. Les critères actuels de sélections, guidés par les impératifs industriels, devront être repensés. L'intérêt industriel repose sur une ressource présentant une concentration maximale en produit à extraire. Le principale « diluant » à « limiter est donc la lignocellulose. L'intérêt de l'agriculteur est de produire un maximum de biomasse utile tant que des critères de richesse en produit à extraire n'interviennent pas dans la structure du prix d'achat.

En dehors de la sélection sur des critères associés à la production de biomasse et de ses constituants, il existe quelques pistes de recherches pour améliorer le potentiel photosynthétique des cultures (Lee, JW & al. 2002 ; Kheshgi, HS & al. 2000). Elles visent à accroître la densité de chloroplastes pour augmenter l'interception des photons. Elles visent aussi à réduire leur taille pour augmenter la surface photoactive. Les chloroplastes sont en effet inhibés pendant la période de réaction photochimique qui suit l'interception d'un photon. Ce phénomène réduit la surface fonctionnelle.

### ***Positionnement opérationnel***

Différentes sources de matériel végétal sont disponibles pour améliorer la production de biomasse de la canne à sucre. Les sélectionneurs canniers de Guadeloupe (CIRAD, UPR75) rejettent couramment en fin de sélection des variétés riches en sucre mais trop riches en fibre (17 à 20%). Ce type de matériel est désormais conservé en vue de son utilisation dans les projets biomasse. Nous disposons par ailleurs dans nos collections de Roujol des espèces sauvages et de quelques croisements interspécifiques dont les caractéristiques pourraient conduire à des tests directs au champ.

Nous envisageons aussi de mettre en place un dispositif spécifique de sélection pour les composantes de la biomasse autre que les sucres. Il nous est en effet possible de disposer de fuzz. Ces graines de canne à sucre sont produites dans les centres de création variétale par hybridation (Guadeloupe, CIRAD) et par hybridation interspécifique orienté vers la fibre (Barbade, WICSGBS). Des contacts sont également maintenus avec le CERF sur l'île de La Réunion pour une fourniture éventuelle de fuzz. Les importations de fuzz sont interdites sur le territoire français (DOM-TOM). Des dérogations sont cependant possibles pour nos projets. Ils impliquent l'obtention préalable d'une ATI (Autorisation Technique d'Importer) par les services de Protection des Végétaux.

Des autorisations pour introduire des variétés fibreuses créées à Barbade (codées WI pour West Indies, alors les variétés sucre sont codées B pour Barbados) sont en cours au travers de l'UPR75 et de la quarantaine du CIRAD à Montpellier. Le matériel devrait arriver rapidement en quarantaine. Les délais de mise à disposition sont de 2 ans si le matériel entré en quarantaine s'avère sain. Il est de 3 si des viroses ou bactérioses sont identifiées et nécessitent des cultures de méristème et des thérapies thermiques. Ce matériel végétal élite que nous envisageons ainsi d'importer peut ne pas répondre à nos besoins. Il a été sélectionné sur des sols vertiques en zone pluviale relativement sèche, environnement qui peut ne pas correspondre aux milieux pédo-climatiques de nos projets.

Nous avons aussi entrepris de collecter des espèces sauvages du Groupe Saccharum (Eriantus et Spontaneum). Ce matériel n'est pas brevetable. Il nécessite cependant les mêmes normes de quarantaine de la canne à sucre.

Des collections de graminées fourragères existent en Guadeloupe (INRA) et dans de nombreux pays, ou il est facile de se procurer des semences pour débiter des évaluations. Nous pourrions ainsi disposer facilement d'espèces comme le Pennisetum Purpureum dans nos tests. Nous n'envisageons pas, tant que les potentialités du matériel fourrager n'auront pas été déterminées, de réfléchir à l'opportunité d'un programme d'amélioration de ces cultures. Ce matériel végétal sera donc traité conjointement avec les espèces sauvages du groupe Saccharum.

## **La culture**

### ***Age et milieu***

Les recherches de ces dernières années sur les composantes de la biomasse de la canne à sucre concernent l'industrie papetière (Egypte, Inde) et beaucoup plus fréquemment l'élevage (essentiellement Brésil). Les résultats sont limités aux teneurs en cellulose et en lignine des coproduits. Peu de recherches portent sur la valorisation de la biomasse résiduelle, qu'il s'agisse de sa récolte que de sa valorisation. Très peu de recherches ont été orientées vers la production quantitative et qualitative de la totalité de la production.

Les études relatives à la canne à sucre portent sur la valeur fourragères (Hernandez M. et al. 2004 ; De Andrade JB. et al, 2003), son évolution entre deux périodes de récolte (De Andrade JB. et al, 2004 ; Fernandes et al. 2003, Salas, M. et al. 1992, Bamba, M. et Valdez, R.E., 1976) et son évolution après récolte (Aranda E.M. et al. 2004).

Une équipe brésilienne (IAC de Campinas) a mis en évidence une forte variabilité des teneurs en cellulose, hémicellulose et lignine lié à la variété de canne à sucre et à son stade de développement (test de 60 variétés cultivées pour le sucre). Les variations, positives comme négatives, sont significatives (De Andrade et al, 2004).

Ces quelques résultats soulignent l'influence importante du stade de développement du couvert (âge) sur la composition de la biomasse. L'effet variétal implique des interactions fortes entre le génotype et l'environnement pour certains caractères relatifs à la synthèse des carbohydrates de structure.

Pour les productions fourragères, notre approche se limite actuellement au modèle que constitue l'herbe à éléphant. Des recherches récentes abordent la problématique de partition de la biomasse de cette culture au cours du cycle (Overman, A.R. ; Woodard, K.R., 2006). Nous envisageons des associations avec les agrostologues pour partager leur approche et leurs résultats qui répondent à des objectifs proches des nôtres.

### ***Intrants***

Les possibilités d'accroissement de la production par le jeu des intrants (engrais et pesticides) ne sont pas envisagées. Le caractère non durable de ce type d'intensification aux fortes externalités négatives (environnement, économie) est largement décrit. Les systèmes durables que nous recherchons reposent sur un bon équilibre entre les besoins minéraux des cultures, les disponibilités du sol (Pouzet & al. 1998) et l'optimisation des techniques agronomiques :

- Rotation avec des légumineuses et des cultures arbustives aptes au recépage (azote, exploitation à des profondeurs différentes des ressources du sol) ;
- Forte densité de culture pour accélérer la couverture du sol à l'implantation (enherbement, érosion) et accroître la durée du cycle de production ;
- Choix d'espèces et de variétés sur des critères d'aptitude à la repousse afin de réduire la fréquence des replantations qui grèvent l'économie de production.
- Prise en compte des exportations minérales supplémentaires liées à l'usage des résidus de récolte.

Nous n'aborderons les problématiques très spécifiques que les intrants peuvent jouer sur la qualité de la biomasse produite (essentiellement azote et irrigation) que si les usages le nécessitent.

Le désaisonnement de la production avec dans certaines situations la possibilité de mettre au point une récolte répartie sur l'année peut poser des problèmes spécifiques de modulation d'emploi des engrais et des herbicides.

### ***Mécanisation et procédés industriel***

Les performances impressionnantes des hybrides sélectionnés pour la fibre en Louisiane (Giamalva, M. J., 1986; Clarke, S.J.), n'ont pas aboutit à l'époque à leur diffusions. Les chutes du prix du pétrole ne sont pas la seule explication. Les essais industriels, qui font référence à une

technologie des années 80, n'ont pas été concluants. Les pertes à la récolte étaient considérables avec une partie importante des tiges couchées par les machines puis/et écrasées au sol (tiges hautes, fines, fibreuses, tallage intense effaçant les interlignes) tandis que les procédés d'extraction du sucre apparaissaient inadaptés à une ressource fibreuse donnant un jus pauvre en sucre et d'une mauvaise pureté (faible débit de broyage, fortes consommations d'énergie et d'eau d'imbibition, très faible taux d'extraction). Des problèmes comparables sont intervenus vingt ans plus tard avec les premières variétés fibreuses de Barbade. Cet exemple souligne la nécessité de recherches agronomiques en machinisme agricole et en technologie industrielle du sucre pour valoriser le potentiel des cannes à sucre fibreuses. Ils soulignent aussi le peu d'évolution de la technologie et de la mécanisation de la culture. Les essais conduits à Barbade à partir de 2000 avec des variétés riches en fibre soulèvent en effet en grande partie les mêmes problèmes (Pouzet, D. 2007). La première variété canne-fuel du WICSGBS (West Indies SugarCane Central Breeding Station), en cours d'évaluation agronomique à Barbade, au Guyana et à Belize (WI79460, 23,5 à 27% de fibres), génère des pertes de 50% lors des récoltes mécaniques, le matériel agricole disponible étant encore inadapté à la taille des plantes et à la collecte simultanée de la biomasse sur pied et au sol (Rao, S., 2007, 2006).

La culture constitue le moyen quasi immédiat d'accroître de manière spectaculaire la production utile de biomasse ligno-cellulosique sans aucune autre modification que celle de la récolte. Encore faut-il que le coût additionnel de récolte de chargement et de transport associé au supplément de production ne dépasse pas sa valeur d'usage. Le déficit du machinisme agricole serait donc de récolter en un seul passage la totalité de la biomasse produite.

La partie non récoltée des cultures est généralement très importante. Dans le cas de la canne à sucre, nos estimations (Pouzet D. et al. 2002) de biomasse résiduelle au sol sont de 10 à 12 t/ha de matière sèche pour 100 tonnes de canne commerciale. Ces chiffres correspondent à des cycles de culture de 12 mois, et une récolte manuelle sans brûlis réalisée en saison sèche. Nous avons atteint des chiffres de près de 20 t de matière sèche au sol pour des parcelles récoltées mécaniquement canne tronçonnées. Des études récentes conduites sur 3 cultivars et 15 parcelles de production dans le sud Brésil, conduisent à des productions résiduelles proches des nôtres et mettent en évidence la masse fraîche, son humidité moyenne et son volume important à gérer :

Variété	Biomasse résiduelle t/ha		Energie (MJ/ha)	Sucre t/ha	Volume m <sup>3</sup> /ha
	Humide	sèche			
RB 72454	23,73	12,38	238205,4	15,26	807,12
RB 806043	21,00	10,55	177158,8	14,48	590,95
RB855536	26,90	13,80	305249,1	16,95	818,30

Les auteurs (Sartori, M. et Florentino, H., 2007) ont élaboré un logiciel d'aide au choix variétal pour optimiser la balance énergétique de la biomasse résiduelle du champ à l'usine.

Dans les projets qui ne s'intéressent qu'à la lignocellulose, la récolte devra être répartie sur l'année ou 11 mois par an (maintenance de l'outil industriel lorsque l'accès aux parcelles est le plus difficile). Les problèmes de la biomasse résiduelle devront alors faire l'objet de recherches spécifiques en évaluant puis en intégrant la dynamique de production de résidus caducs dans les définitions de cycle de production (dates de plantation, âge à la récolte).

Un consensus doit exister entre les modalités de récolte (plante entière, broyée, broyée et compressée), les délais possibles de traitement de la récolte (entre la coupe et le traitement industriel) la durée de conservation post récolte, le volume de stockage de sécurité et le mode de traitement par l'usine de la biomasse livrée.

### **Economie et coûts de production**

L'amélioration du résultat économique des systèmes implique de conduire des recherches spécifiques. Il s'agit notamment :

- De diminuer des coûts de production en lien direct avec une réduction de l'emploi d'énergie fossile et plus globalement d'émission de GES;
- D'améliorer la gestion et l'organisation de la production ;

- D'argumenter les problématiques de dimensionnement de l'outil agro-industriel en prenant en compte non plus le seul aspect financier (retour sur investissement, taux de rentabilité interne... « big is better ») mais les externalités négatives liées à l'économie d'échelle (transport, création d'emploi, usage du domaine public, rentabilité des aides, pollution induites, sécurité de production... « small is sustainable ») ;
- De participer à la structuration des prix d'achat aux producteurs. Cet aspect nécessite l'évaluation de la qualité de la biomasse livrée. L'utilisation du SPIR déjà évoqué est incontournable pour estimer à l'entrée des installations industrielles les teneurs des principales composantes et les caractéristiques physiques importantes pour l'industriel (valeur calorifique, teneur en eau...).

Ce volet économique est fondamental. Il conditionne la crédibilité des propositions de la recherche auprès des industriels. Il permet d'évaluer les améliorations que nous apportons à la filière. Il permet aussi d'identifier de manière fine les postes pour lesquels des réductions de coûts peuvent être envisagés.

## ***Conséquences pour la recherche***

IL est possible de moduler la production des principales composantes de la lignocellulose par les techniques culturales (variété, âge de récolte, fréquence et période des coupes...). Les perspectives d'accroissement des performances pour chaque constituant ou un ensemble d'entre eux répondant à un usage spécifique sont excellentes. Deux particularités sont particulièrement novatrices pour l'élaboration des itinéraires techniques de production dédiée à la lignocellulose :

- la récolte de toute la biomasse produite ; et
- l'extension de la période de récolte au-delà des périodes de maturation liées à toute production mono-usage, voir son étalement annuel

Les actions que nous proposons reposent sur des problèmes scientifiques innovants (1) de déterminisme génétique des composantes de la biomasse ; (2) de compréhension des mécanismes de formation des composantes de la biomasse au cours du cycle de culture en fonction des conditions pédoclimatiques et (3) d'évaluation du concept de durabilité et de sa prise en compte dans les approches économiques. Les points 1 et 2 sont par ailleurs dépendant au travers de l'expression des caractères liés à la biomasse en fonction des conditions environnementales.

Le dernier point innovant est du domaine agro-économique. Il concerne les méthodologies d'évaluation holistiques des problématiques environnementales et sociales liées à la production de biomasse dédiée à la lignocellulose. Il concerne également les modes de gestion de cette production dans ses aspects multi-usages. Il concerne enfin les problèmes d'arbitrages relatifs aux décisions d'affectation foncière pour des productions alimentaires ou industrielles.

## Principaux documents consultés

- Pouzet, D. Novembre 2007. Rapport de mission au Guyana. CIRAD PERSYST UR5 « Systèmes canniers ». Marie Galante le 2/11/2007. 14 p.
- Knight, P., October 2007. Food versus fuel debate boosts efforts to produce cellulosic ethanol in Brazil. *International Sugar & Sweetener Report*, F.O.Lichts GmbH, Vol 139 N°32 / 29.10.2007 p 559-564.
- Rao Seshagiri P. October 2007. Varieties for Sugar Association of Caribbean Sugar Cane Industries. Presentation power Point. 35 slides. In Wisben Workshop, Guyana, 21-27 October 2007. West Indies Central Sugar Cane Breeding Station (WICSCBS).
- Sartori, M.M.P., Florentino, H.O., 2007. Energy balance optimization of sugarcane crop residual biomass. *Energy*, Vol 32, N° 9, Septembre 2007, pp. 1745-1748
- *Gazeta Mercantil*, 30/06/2007. [www.dci.com.br](http://www.dci.com.br) et [www.panoramabrasil.com.br](http://www.panoramabrasil.com.br)
- IAR. Pôle Industrie et Agro-Ressources. Régions Champagne-Ardenne et Picardie, 2007 : [www2.iar-pole.com](http://www2.iar-pole.com)
- Gomez J., Chapelle D., McDonald L., May-June 2007. Sugar losses in burnt and green cane harvesting in Argentina. *Sugar Cane International*, May-June 2007, Vol 25, N° 3, pp 21-24.
- WU, L.; Birch, R. G., 2007. Doubled sugar content in sugarcane plants modified to produce a sucrose isomer. *Plant Biotechnology Journal*, 2007.5, pp. 109-117.
- Boe, A., Lee, D.K., 2007. Genetic variation for biomass production in prairie cordgrass and switchgrass. *Crop science*, vol 47, May-June 2007. pp 929-934.
- Gray, K. A., 2007. Cellulosic ethanol – state of the technology. *International sugar journal*, vol. 109, N° 1299. pp 145-151.
- Overman, A.R.; Woodard, K. F., Simulation of biomass partitioning and production in elephantgrass. *Communication in soil science and plant analysis*. 2006; 37 (13-14): 1999-2010.
- Rao, P. S., November 2006. BREEDING SUGAR CANE VARIETIES for SUGAR, ETHANOL AND ELECTRICITY. West Indies Central Sugar Cane Breeding Station, BARBADOS. Présentation power point lors de la réunion CIRAD réseau WISBEN. 17 au 21 octobre 2006
- FAO, November 2006. *Livestock's Long Shadow – Environmental Issues and Options*.
- Cabidoche, Y-M., Jannoyer, M., Vannière, H., Juin 2006. Conclusions du groupe d'étude et de perspectives « Pollution par les organochlorés aux Antilles » Aspects agronomiques. CIRAD/INRA, Juin 2006. 66 p.
- Dupré, J-Y et Prevot, H., Mars 2006. A paraître. Rapport de mission interministérielle dans les DOM, portant sur la valorisation de la biomasse à des fins énergétiques et le développement d'une filière biocarburant.
- Balat, M. 2006. Biomass energy and biochemical conversion processing for fuels and chemicals. 2006. Part A : Recovery, utilization and environmental effects. *Energy Sources*: 28 (6), pp 517-525.
- Edye, L.A.; Doherty, W.O.S.; Blinco, J.A.; Bullock, G.E., 2006. The sugarcane biorefinery : Energy crops and processes for the production of liquid fuels and renewable commodity chemicals. *International Sugar Journal*, 2006. Vol 108 N° - pp. 19-27
- Patzec, T.W., Pimentel D., 2005. Thermodynamics of energy production from biomass. *Critical review in plant sciences*, 24: 327-364.
- Lakshmanan, P.; Geijskes, R.J.; Aitken, K.S.; GROF, C.L.P., Bonnett, G.D.; Smith, G.R.; 2005. Sugarcane biotechnology: The challenges and opportunities. August 2005: *In vitro Cell. Dev. Biol. Plant*. 41 pp 345-363.
- Maecelo, E. ; Dias de Oliviera, Burton E., Vaughn, Rykile, E.J. 2005. Ethanol as fuel: Energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. *BioSciences July 2005*. Vol 55, 7 HS, pp 593-602.
- Colonna, P, Juin 2006. *La chimie verte*, Editions TEC & DOC. Edts Lavoisier, Paris, 211 p.
- Rao, P.S., Albert-Thenet, J.R., 2005. Fuel cane biomass potential for year round energy production. *Proc. ISSCT Vol, 2005, Guatemala*.
- Hertford, R., May 2005. A paraître. Barbados: Agriculture's competitiveness. Final report. IADB consulting, Agricultural Planning Unit, Ministry of Agriculture and Rural Development. Document provisoire, 107 p.
- Albert-Thenet, J. R., and Rao, P., S., 2005. Fuel cane for the production of electricity in Barbados. WISBEN meeting, Barbados, 8 p.
- Rigal, L., Juin 2005. Journée technique "biomasse et environnement. Biomasse et matériaux : une réalité. Journée technique AGRICE-ADEME « biomasse et environnement ». Laboratoire de chimie agroindustrielle UMR 1010/INRA/INP-ENSIACET, Toulouse, 36 p.
- Godshall, M. A., 2005. Enhancing the agro-industrial value of the cellulosic residues of sugarcane. *International Sugar Journal*, 2005, Vol 107, N° 1273, pp 53-60.
- Kessari, M.E., Langellier, P., Novembre 2005. Evaluation des productions mondiales de bagasse et de résidus de récolte. Disponibilités pour le futur. Projet ULCOS. CIRAD Montpellier, 30 p.
- Programme National de Recherche sur les bioénergies, Février 2005. 57 p.

- Kelley, S.S., Rowell, R.M., Davis, M., Jurich, C.K., Ibach, R., 2004. Rapid analysis of the chemical composition of agricultural fibers using near infrared spectroscopy and pyrolysis molecular beam mass spectrometry. *Biomass and Bioenergy*, 2004. Vol 27, pp. 77-88.
- Hernandez, M., Simon, L., Sanchez, S., 2004. Rendimiento forrajero de la cana de azucar asociada a leguminosas arboreas. I. Primer ano de evaluacion. *Pastos y Forrajes*. VOL 27, N° 1, 2004 pp 51-54
- Aranda, E.M., Ruiz, P., Mendoza, G.D., Marcoff, C.F., Ramos, J.A., Elias, A., 2004. Changes in the digestion of three varieties of sugarcane and their fiber fraction. *Cuban Journal of Agricultural Science*, Volume 38, N°2, 2004. pp 135-141.
- Klass, D., *Biomass for renewable energy and fuels*. Encyclopedia of energy. Oxford. Edt Elsevier; 2004.
- Rao, P. S. and Kennedy, A., 2004. Genetic improvement of sugarcane for sugar, fibre and biomass. Ministry of Agriculture Annual Conference, Barbados, 2004. 13 p.
- De Andrade JB., Ferrari E. Jr., Possenti RA., Pozar Otsuk I., De Andreade Landell, M.G., 2004. Composição química de genótipos de cana de açucaie em duas idades, para fins de nutrição animal. *Bragantia*, Campinas, v.63, n.3, p.341-349, 2004
- Wellich, E., Novembre 2004. Première année 2004-2005 du plan stratégique pour le réseau canadien d'innovation dans la biomasse. Programme de recherche développement. RCIB, 81 P.
- Werpy, T., Petersen, G. Edits, August 2004. Top value added chemical from biomass. Volume I – Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas. Department Of Energy, Energy Efficiency and renewable Energy. 68 p.
- Swierczynski, D., 2004. Elaboration et développement d'un catalyseur Ni/Olivine pour la production d'hydrogène par gazéification de la biomasse en lit fluidise. Thèse de doctorat en chimie, Université Louis Pasteur.
- A. Morand, June 2004. Bagasse cogeneration – Global review and potential. WADE (World Alliance for Decentralized Energy), [www.localpower.org](http://www.localpower.org), 72 p.
- Ritter, S. K., 2004. Biomass or bust. Technology to use plant-derived sugars to produce chemical feedstocks is ready... and waiting. *Chemical and engineering news*. May 31, 2004. pp 31-34.
- Paster, M., Pellegrino, J. L., Carole, T., M., July 2003. Industrial bioproducts: Today and tomorrow, July 2003. Energetic, Incorporated, Columbia, Maryland, for the US DOE. 90 p.
- Biocap Canada, 2003. Evaluation des possibilités et des défis d'une économie axe sur la biotechnologie pour la recherché agroalimentaire au Canada. Conseil de Recherches Agroalimentaire du Canada, CARC, 25 p.
- Fernandes, A. M., De Quieroz, A. C., Pereira, J.C., Lana, R. Barbosa, M.H.P., FOncesca, D.M., Detman, E., Cabral, E.S., Vittori, A. 2003. Composicao quimico- bromatologica de variedades de cana de azucar (*Saccharum spp L.*) com diferentes ciclos de producao (precoce e intermediario) em tres idades de Corte. *R. Bras. Zootec.* 2003. vol 32, N° 4, pp 977-985
- Andrade, J.B., Junior, E.F., Possenti, R.A., Otsuk, I.P., Zimback, L., Landell, M.G.A., 2003. Seleccion de 39 variedades de cana de azucar para a alimentacao animal. *Brazilian Journal of veterinary. Research ans Animal Science* (2003). Vol 40 pp 287-296.
- Isais de Carvalho, Macedo, Manoel Regis Lima Verde Leal, João Eduardo Azevedo Ramos da Silva, December 2003. Greenhouse gas (GHG) emissions in the production and use of ethanol in Brazil: present situation (2002). Universidade de Campinas y Centro de Tecnologia de Copersucar. 47 p.
- Martiné J.F., 2003. Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 132 pp.
- Lee, JW; Mets, L., Greenbaum, E. Improvement of photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation at high light intensity through reduction of chlorophyll antenna size. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 2002; vol 98-100, pp 37-48.
- McLaughlin, SB; Ugarte, DGDL; Garten, CT, Lynd, LR; Sanderson, MA, Tolbert, VR; Wolf, DD. High-value renewable energy from prairie grasses. *Environmental Science ans Technology*, 2002; Vol. 36, N° 10, pp 2122-2129.
- Ministère de l'économie, 2002. Programmation pluriannuelle des investissements de production électrique, Rapport au parlement, 29 Janvier 2002, 80 p.
- Ecobilan/PriceWaterhouseCoopers/ADEME/DIREM. December 2002. Energy and greenhouse gas balance of biofuels production chains in France. Executive summary, données de reference.
- Kinoshita, C. M., Turn, S., Q., and Brain, R., L., 2002. Biomass Gasification for combined heat and power in the cane sugar industry. *International Sugar Journal* 2002, Vol. 104 No 1242.
- Morris, M, Waldheim L., Linero F., A., B. and Lamonica, H., M., 2002. Increased power generation from sugarcane biomass – The result of technical and economic evaluation of the benefits of using advanced gasification technology in a typical Brazilian sugar mill. *International Sugar Journal* 2002, Vol. 104 No 1242.
- Pouzet, D., Velle, A., Rassaby, A., Février 2002. Estimation des résidus de récolte de la canne à sucre. Bilan des études menées au cours des campagnes 2000 et 2001 sur l'île de La Réunion. CIRAD-CA Programme CAS – Pôle Canne à Sucre. Saint Denis, 14 p.



- CANUC, 2002. *Système de gestion des marches stratégiques. Produits chimiques « plates-formes*. 24 p. Olson, E.S., June 2001. *Conversion of lignocellulosic material to chemical and fuel. Final report. Energy & Environmental Research Center. University of North Dakota. Subtask 4.1., 10 p.*
- Larson, E., D., Williams, R., H., and Leal M. R., 2001. *A review of biomass integrated-gasifier/gas turbine combined cycle technology and its application in sugarcane industries, with an analysis for Cuba. Energy for Sustainable Development. Volume V No 1, March 2001. 54-76.*
- Rogers, R.D., Spear, S.K., Swatloski, R.P., Reichert, W.M., Gosdall, M.A., 2001. *Non-sugar products from sugarcane for the new millennium: green pathways to a carbohydrate economy ? 2001. Publication of technical paper and proceedings of the annual meeting – Sugar industry pp 291-301*
- Christou, Ch, Mardikis M. , Kyritsis S., Cosentino S., Jodice R., Vecchiet M. and Gosse G. 2001. *Screening of Arundo donax L. populations in South Europe, Proceedings of First World Conference on Biomass for Energy and Industry Sevilla, Spain, 5–9 June (2001), pp. 2048–2051*
- Briceño, C.O., Cock, J.S., Torres, J.S., 2001. *Electric power from green harvesting residues of sugar cane in Columbia. Sugar Cane International, March 2001, 15-19.*
- Rogers, D.R., Spear, S. K., Swatloski, R.P., Reichert, W.M., 2001. *Non-sugar products from sugarcane for the new millennium: Green pathway to a carbohydrate economy? Proceedings of the annual meeting sugar industry. 2001, Vol 60, N° HS, P 291-301.*
- Moreira, J. R., 2000. *Sugarcane for energy – recent results and progress in Brasil. Energy For Sustainable Development, Vol IV, N° 3, October 2000. p 43-54.*
- Kheshgi, HS ; Prince, RC, Marland G. *The potential of biomass fuels in the context of global climate change: Focus on transportation fuels. Annual Review of Energy and Environment, 2000; Vol 25, pp 199-244.*
- Yan, W., Lan, C., Liang, H., 2000. *R&D on paper-making from bagasse in Guitang. SPRI 2000 Conference on Sugar Processing Research. 274-285.*
- Pouzet, D., Martiné, J-F., Leinhart, B., Février 1999. *Evaluation des conseils en fertilisation de la canne pour les hauts rendements. Variétés R570 et R579 en culture irriguée à satisfaction des besoins sur sol brun fertile. CIRAD CA, Saint Denis, La Réunion. 34 p.*
- DOE/GO, 1998. *Plant/crop-based renewable resources 2020. A vision to enhance U.S. economy security through renewable Plant/crop-based resources. January 1998, US DOE /GO-10097-385. 28 p. <http://www.science.doe.gov/bes/eb/Publications/vision2020.pdf>*
- Klass D. L., 1998. *Biomass for renewable energy, fuels and chemical Academic press, San Diego, California. 651 p.*
- Pouzet D., Chabalière P.F., Legier P., 1998. *Fertilité des sols et conseil en fertilisation, Système expert d'interprétation des analyses chimiques des sols réunionnais. Amendement et conseil en fertilisation pour la canne à sucre, les graminées fourragères, l'ananas et le bananier. Saint-Denis, Réunion, CIRAD-CA, 96 p, Documents de travail du CIRAD-CA, n. 1-98.*
- Sunil H.K. and Lawrence M.J. (1996). *Quantitative genetics of sugarcane. I. A large-scale evaluation of Saccharum germplasm. Sugar Cane 6:3-10.*
- Girgis, B.S., Khalil, L.B., Tawfik, T.A.M., 1994. *Activated carbon from sugar cane bagasse by carbonization in the presence of inorganic acids. J. Chem. Tech. Biotechnol. 1994, 61, 87-92*
- Jackson P.A. (1994). *Genetic relationships between attributes in sugarcane clones closely related to Saccharum Spontaneum. Euphytica 79: 101-108.*
- Salas, M., Aumont, G., Biessy, G., Magnie, E., 1992. *Effect of variety, stage of maturing and nitrate fertilization on nutritive values of sugar canes. Animal feed science and technology, VOL 39 (1992) pp 265-277.*
- White, R.H., 1987. *Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. Wood and Fiber Science, 1987, vol 19 N°4, pp. 446-452.*
- Clarke, S. J., Giamalva, M. J., 1986. *Material and energy balance for processing high fiber sugarcane. Biomass Energy Development, 1986: 607-620.*
- Clarke, S.J., Keenleyside, W., 1986. *Cane varieties for power production. Proc inter American sugar cane seminar, 1986:102-115.*
- Alexander, A. G., 1985. *The energy cane alternative. Sugar series, 6. Elsevier Science Publisher, B.V. 1985. 510 p.*
- Giamalva, M. J., Clarke, S. J., Stein, J. M., May 1984. *Sugarcane Hybrids of Biomass. Biomass 6 (1984) 61-68.*
- Salas, M., Aumont, G., Biessy, G., Magnie, E., 1992. *Effect of variety, stage of maturity and nitrate fertilization on nutritive values of sugar canes. Annual Feed Science and Technology, 39 (1992) 265-277.*
- Alexander, A. G., 1979. *Production of sugarcane and tropical grasses as a renewable energy source. First and second quarterly reports to the DOE, Fuels from Biomass Systems Branch. Year 3, 1979-80.*
- Randa, M., Valdez, R.E., 1976. *Effect of stage of maturity on nutritive value of sugar cane. Trop Anim Prod 1976 1:94-97.*
- Brown A.H.D., Daniels J. and Latter B.D.H. (1969). *Quantitative genetics of sugarcane. II. Correlation analysis of continuous characters in relation to hybrid sugarcane breeding. Theor. Appl. Genet. 39:1-10.*

# ***Annexe : Quelques usages de la biomasse en cours de développement***

## **Introduction**

Les filières de développement de bioproduits à partir de la biomasse sont très nombreuses et souvent au stade recherche développement (RD) avec des espérances d'application à court terme (5 à 10 ans). De nombreuses références sont accessibles sur internet. Elles concernent la biomasse brute comme raffinée. Nous ne citons dans le texte qu'un nombre limité de références et de liens compte tenu de leur nombre et de l'évolution très rapide des informations. Nous résumons ici quelques tendances marquées des recherches en cours sur les usages de la biomasse et plus particulièrement de la lignocellulose sans aucune prétention à l'exhaustivité. La partie biocarburant en particulier n'a pas été développée ici car elle est fortement contrainte par les politiques de chaque pays indépendamment de leur intérêt réel pour la production d'énergie renouvelable et l'environnement. Son empreinte écologique est par ailleurs contestée autant que son rôle dans l'envolée des prix des denrées alimentaires de base.

Certaines des informations collectées relèvent plus d'effet d'annonce d'une réalité concrète. Dans ces conditions, la remise en compte porte sur le calendrier d'application plus que sur les résultats.

## **Biomasse brute**

Les premiers usages de la biomasse brute sont l'élevage pour l'alimentation et la combustion pour produire de l'énergie. Il s'agit des filières les plus courantes et souvent anciennes. Toutes deux utilisent l'énergie constitutive de la biomasse.

Nous ne développerons pas la partie élevage, sinon pour signaler que la valeur de la biomasse pour l'alimentation du bétail est basé sur le rapport des différents constituants de la lignocellulose (cellulose, hémicellulose et lignine) et l'énergie qu'elle contient.

L'utilisation énergétique fait appel à des degrés d'oxydations plus ou moins complète et maîtrisée qui conduit au charbon de bois à la gazéification ou à la combustion. La cogénération est un procédé de transformation de l'énergie de combustion en deux types d'énergie qui sont en général de l'électricité et de la vapeur. L'intérêt est un bien meilleur rendement énergétique. Les rendements les plus élevés sont obtenus par la tri génération qui produit en plus du froid. Les limites à ces procédés dans les pays du sud son l'absence de besoin de tout ou partie de l'énergie sous forme de vapeur ou de froid. On ne trouve donc de telles installations qu'à proximité d'usines utilisant la vapeur (sucrieries, distilleries).

La valeur énergétique de la biomasse, est liée en premier lieu au rendement en matière sèche et plus particulièrement en fibres. L'accroissement du rendement en lignine, qui est le composant le plus énergétique de la lignocellulose (Colonna, 2005, White, R., 1987) est susceptible d'améliorer largement ce résultat.

Une oxydation poussée conduit à la production de gaz de synthèse aussi appelé syngas<sup>1</sup> qui sert à la synthèse chimique d'hydrocarbures purs (maîtrise du nombre d'atome de carbone des chaînes lors des réactions) par le procédé Fischer Tropsch<sup>2</sup>. La technique est au point pour des unités importantes avec une biomasse bien calibrée. De nombreuses recherches sont en cours que le procédé soit plus stable en présence d'une biomasse de qualité variable ainsi que pour éliminer les goudrons et impuretés du syngas qui limitent rapidement la durée de vie des catalyseurs.

Une autre voie très classique pour récupérer une partie de l'énergie contenue dans la biomasse est la méthanisation<sup>3</sup>. Elle est couramment employée aujourd'hui pour dépolluer des effluents comme les vinasses de distillerie qui présentent une DCO très élevée

---

<sup>1</sup> Ou gaz synthétique (CO + H<sub>2</sub>)

<sup>2</sup> Procédé actuellement développé aux USA, en Afrique du Sud et en Malaisie pour le charbon. Des études sont conduites en France (Université Louis Pasteur) pour purifier le syngas par voie catalytique.

<sup>3</sup> Le biogaz qui contient 65% de méthane (CH<sub>4</sub>) et le reste en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) nécessite un apport d'azote dans le cas de la bagasse de canne à sucre très pauvre en N. Un procédé utilisant des cultures de légumineuses (N-bio) est en cours de développement au Brésil en collaboration avec une société américaine.

Parmi les autres utilisations de la biomasse brute, citons les très nombreux bioproduits ou biocomposites réalisés à partir de la biomasse de canne à sucre<sup>4</sup> : géotextiles, capteurs recyclables d'hydrocarbures, papier, panneaux, polymères par association directe à de l'amidon... De nombreux meubles fabriqués en Asie (notamment en Thaïlande) proviennent de panneaux d'agglomérés de bagasse de canne à sucre.

## Raffinage

La biomasse raffinée et purifiée par hydrolyse thermochimique ou biochimique<sup>5</sup> ou par l'utilisation de solvants ioniques (Rogers, R., 2001) permet de produire du glucose, constituant de la cellulose, des pentoses comme le xylose et l'arabinose qui proviennent des hémicelluloses<sup>6</sup> et à des molécules organiques cycliques (phénoloques) à forte valeur ajoutée potentielle issues des lignines. Ces molécules conduisent à de larges gammes de produits par des voies multiples (chimiques, thermochimiques, fermentation, extrusion...). De nombreux procédés n'hydrolysent que partiellement la lignocellulose et utilisent les polymères intermédiaires comme base de nouvelles réactions chimiques.

Les produits plate-forme les plus prometteurs issus de cette matière première sont au nombre de douze<sup>7</sup> (NREL<sup>8</sup>, 2005, CANUC<sup>9</sup>). La technologie permettant de produire des molécules chimiques à partir des sucres issus des plantes est fonctionnelle (Ritter, S. K., 2004). Principalement issue du « DOE biomass program »<sup>10</sup>, elle conduit à des produits secondaires multiples comparables à ceux de la chimie du pétrole mais aussi à de nouvelles molécules aux propriétés spécifiques. Des unités de production sont déjà fonctionnelles aux USA<sup>11</sup>. Les études de RD impliquent aujourd'hui plus de 250 industriels<sup>12</sup>. Des études sont également conduites en France (AGRICE-ADEME, PRNB). Elles mobilisent de nombreux chercheurs, développeurs et producteurs<sup>13</sup>.

Ces filières sont généralement associées à la biomasse ligno-cellulosique forestière mais aussi cannière constituant les déchets industriels volumineux. Le rendement des filières comme leur intérêt économique dépend, en dehors de l'économie de production de la ressource, de la qualité des ligno-celluloses<sup>14</sup> et par voie de conséquence des espèces, des cultivars et des itinéraires techniques (âge à la récolte).

<sup>4</sup> Une étude du département américain de l'agriculture sur les fibres autres que le bois cite 255 fois la bagasse pour les matériaux de construction (citation de Godshall, 2005).

<sup>5</sup> Nombreuses recherches en cours pour mettre au point des bioraffineries de biomasse ligno-cellulosique. Les difficultés concernent l'hydrolyse de la cellulose (voie chimique coûteuse et polluante, voie biochimique onéreuse du fait d'un prétraitement délicat, de l'inhibition de la cellulase par le glucose et de son inactivation par des traces de lignine), la filière hémicellulose (les pentoses sont peu fermentescibles par les levures) ; la sélection de souches utilisant les pentoses est en cours en France) et la lignine (la récupération des produits du craquage n'est pas au point). Des recherches sont conduites en France sur la dégradation enzymatique des lignines (champignons).

<sup>6</sup> Les hémicelluloses contiennent aussi de faibles quantités de glucose et de mannose.

<sup>7</sup> Ces produits sont les diacides 1-4 (succiniques, fumariques et maliques) ; l'acide 2,5 dicarboxylique furan ; l'acide 3 hydroxy propionique ; l'acide aspartique, l'acide glucarique, l'acide glutamique, l'acide itaconique, l'acide levulinique ; le 3 hydroxybutyrolactone, le glycérol, le sorbitol et le xylol/arabinol.

<sup>8</sup> National Renewable Energy Laboratory (USA)

<sup>9</sup> Canadian Agricultural New Uses Council

<sup>10</sup> Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy Office.

<sup>11</sup> Notamment une unité de 140000 t/an de polymères (polylactates) au Nebraska (Cargill Dow) et de copolymère en Caroline du Nord à partir de transformation microbienne (DuPont). ADM (Archer Daniel Midlands) fabrique depuis 2001 un ensemble de bioproduits de base (sorbitol, acide lactique, lysine, acide citrique). Ces unités sont installées au centre des bassins céréaliers de production pour des raisons économiques.

<sup>12</sup> Cité par Biocap Canada : Ethanol (Cargill, ADM, World Energy, Minesota corn processor) ; biodiesel (Ag LCC, World Energy, West Central Soy) ; lubrifiants et fluides hydrauliques (Cargill, ELM, John Deer, Lubrizol) ; Bioplastics (DuPont, Cargill) ; Lactate d'éthyl (Vertec Biosolvents, ADM, Cargill), Acide polylactique (Cargill, Purac North America).

<sup>13</sup> Le Programme National de Recherches sur les bioénergies associe les structures suivantes : ADEME, AFOCEL, Air Liquide, Alstom Power, ARD, CEA, CIRAD, CRNS, Cristal Union, EDF, Europlasma, Europol'Agro, Gaz de France, IFP, INRA, INSA, Lesafre, Maapar, Maguin SAS, ONF, Onidol, Renault saf-Isis, Thales et Total.

<sup>14</sup> Le CIRAD a conduit par exemple des recherches sur les possibilités de production d'arbres pauvres en lignine pour l'industrie papetière

Un processus de fractionnement<sup>15</sup> de la bagasse de canne à sucre a été déposé (US Patent 5,730,837) dès 1998 par le NREL (Godshall, 2005).

Les sources de biomasses agricoles<sup>16</sup> sont les productions naturelles et les cultures. Les forêts et les jachères valorisent des terres peu aptes aux productions alimentaires sans émission de GES<sup>17</sup>. Les cultures font l'objet d'efforts de RD considérables pour accroître leur « durabilité » environnementale<sup>18</sup>. Les besoins quantitatifs en biomasse sont tels que l'on ne peut envisager de faire l'économie de systèmes intensifs, bien que moins performants en matière de GES. La nécessité de créer des emplois conforte cette voie.

Rendement énergétique de quelques productions agricoles (filière biocarburant)

Production	Eproduite/Econsommée	Sources
Essence (50 ppm S)	0.873	ADEME <sup>19</sup>
Gazole	0.90	Ecobilan
Ethanol de blé	2	
Ethanol de maïs	1.03 à 1.12	Marcelo et al.
Ethanol de Betterave	2.05	ADEME
Huile d'oléagineux tempéré	4.7 à 5.5	Ecobilan
Ethanol de Canne à sucre*	8.3 à 10.2 <sup>20</sup>	Macedo et al.
	3.14 à 3.87	Marcelo et al. <sup>21</sup>

\* Au Brésil, la canne est brûlée à la récolte, soustrayant ≈10 t/ha de biomasse résiduelle au bilan<sup>22</sup>

La recherche des cultures présentant les potentiels photosynthétiques les plus élevés s'impose<sup>23</sup>. La canne à sucre, nécessitant peu de consommations intermédiaires (intrants, mécanisation, infrastructures...), peu érosive et tolérante aux sols acides est parmi les productions agricoles les plus performantes (Tableau). Elle présente l'avantage sur la biomasse ligneuse d'une production immédiate et d'un fractionnement mécanique facile. Ce statut est confirmé par le DOE<sup>24</sup> qui estime que la production cannière américaine sera entièrement consacrée à la biomasse en 2010. Sa composition moyenne, modulable par la variété et le cycle de culture, est par ailleurs très intéressante (Balat, M., 2006 ; Gray K., 2007).

Composition moyenne en % de la lignocellulose de quelques plantes

Culture	lignine	cellulose	Hémicellulose
Eucalyptus	20	45	30
Pin (Pinus radiata)	28	42	27
Maïs (résidu = 50% Rdt)	18	35	22
Switchgrass	18	31	24
Bagasse de canne à sucre	24	43	25

<sup>15</sup> Le premier problème à résoudre est de séparer les constituants de la biomasse qui sont intimement imbriqués : la cellulose très cristallisée est reliée par l'hémicellulose, l'ensemble étant protégé par la lignine insoluble et très peu « digestible »

<sup>16</sup> Nous ne traitons pas ici de la valorisation des résidus organiques de nos sociétés

<sup>17</sup> L'utilisation des jachères pour l'élevage s'accompagne de production de CH<sub>4</sub>, 23 fois plus actif que le CO<sub>2</sub> pour le réchauffement climatique (valeurs IPCC GWP – 100). Des recherches sont en cours pour limiter les émissions de CH<sub>4</sub> des ruminants.

<sup>18</sup> Bio-azote par recours aux légumineuses et à la fertilisation organique (le N<sub>2</sub>O et 296 fois plus actif que le CO<sub>2</sub> pour le réchauffement climatique norme IPCC) ; limitation et amélioration de l'usage des pesticides ; amélioration de l'usage de l'eau ; réduction des risques d'érosion...

<sup>19</sup> Poitrat, Etienne, ADEME. Juin 2007. Bilan énergétique de la filière céréalière. Académie des Technologies, Chartres, 26 avril 2007.

<sup>20</sup> Le premier chiffre est la moyenne d'une centaine de sucreries. Le second correspond aux sucreries les plus performantes. Il montre les marges d'amélioration possibles aujourd'hui.

<sup>21</sup> Marcelo a réalisé ses calculs sur les mêmes zones de production que Macebo. Il conteste les chiffres de ce dernier notamment dans le coût énergétique de la production (respectivement 36,0 et 15,2 GJ/ha)

<sup>22</sup> On pourrait y ajouter les conséquences négatives du brûlis sur la production de sucre, La technique destinée à faciliter la récolte manuelle se traduit par une perte de sucre de près de 5% (Gomez, J. et al. 2007) .

<sup>23</sup> Plantes à cycles photosynthétiques en C4 pour la zone tropicale qui nous intéresse.

<sup>24</sup> Department Of Energy US

Les derniers développements concernent les usages dits de seconde génération de la biomasse et surtout de la partie cellulosique (Gray, 2007). Celle-ci est décomposée en ses principaux constituants. La cellulose donne du glucose fermentescible, les hémicelluloses donnent des pentoses désormais fermentescibles<sup>25</sup>. Des usines sont actuellement développées pour produire de l'éthanol de seconde génération à partir de résidus végétaux (Canada, USA, Chine) et des pilotes sont à l'étude sur la canne à sucre (Dedini, Brésil)<sup>26</sup>. Dans ce dernier cas, on compte doubler la production d'éthanol par hectare en passant de 5600 l (sucre) à près de 13000 l/ha (sucre + lignocellulose). Cette évolution pose le problème de la source d'énergie du procédé de distillation. Le Brésil (P. Knight, 2007) envisage de compenser le manque de bagasse combustible en cessant de brûler la culture avant récolte, en récoltant mécaniquement<sup>27</sup> et en ajoutant la biomasse résiduelle entièrement récupérée à la lignine issue du craking de la bagasse. Le groupe Monsanto s'est associé récemment avec une entreprise privée (Allelix e CanaVialis<sup>28</sup>)) brésilienne pour créer des cannes fibres destinées à l'éthanol de seconde génération<sup>29</sup>.

---

<sup>25</sup> Manipulation génétique de levures réalisée par l'Université technologique de Delft en Hollande (<http://www.tudelft.nl>)

<sup>26</sup> Deux pilotes sont annoncés pour 2008 tandis que le développement table sur une usine fonctionnelle en 2012 et la généralisation de la technologie au Brésil d'ici 2020.

<sup>27</sup> Cette évolution positive pour l'environnement (plus de brûlis, mise en valeur de toute la production photosynthétique) va poser de graves problèmes sociaux. L'état de Sao Paulo, principal producteur programme la fin du brûlage en 2017 avec la suppression de 12000 emplois permanents, celle de 190000 emplois de coupeurs, mais la création de 17000 emplois de conducteurs (AFP/29.12.2007).

<sup>28</sup> Groupe Votorantim Novo Negocio. [www.dci.com.br](http://www.dci.com.br)

<sup>29</sup> L'éthanol de seconde génération est aussi qualifié d'éthanol cellulosique. Il existe une imprécision dans ces termes : on ne sait pas implicitement s'ils incluent la part de l'éthanol provenant du sucre et si la technologie d'éthanol hémicellulosique est prise en compte.