



## La biomasse énergétique

Paul Mathis

le 4 aout 2012

### Résumé

La biomasse, fruit de la photosynthèse des plantes, répond à des besoins humains prioritaires : alimentation, matériaux (bois d'œuvre et d'industrie), chimie dite « bio-sourcée ». Elle peut contribuer à notre bouquet énergétique sous trois formes : le bois, pour la production de chaleur et la cogénération, les biocarburants pour les transports, les déchets pour la production de biométhane et la cogénération. La biomasse est une ressource renouvelable, mais limitée par les surfaces de sols. Il faut donc optimiser son usage et l'usage des sols. La production énergétique nette est de 0,6 à 2 tep/ha/an. Des progrès technologiques sont attendus dans la valorisation de la lignocellulose sous forme de carburants liquides ou gazeux.

La biomasse énergie peut contribuer à la transition énergétique à condition d'établir des bilans de gaz à effet de serre complets prenant en compte les besoins d'énergie des procédés, l'émission de N<sub>2</sub>O par les sols, et surtout les fortes émissions de CO<sub>2</sub> qui accompagnent les nouvelles mises en culture de terres, principalement dans les pays tropicaux.

A la différence des énergies renouvelables intermittentes, la biomasse est une énergie stockée. Mais la ressource essentielle, le bois, doit faire l'objet d'une politique à très long terme.

Trois messages principaux : ne pas surestimer la ressource (pour la France, environ 20 Mtep en 2030) ; optimiser l'utilisation de la biomasse produite ; ne pas importer de biomasse énergie.

### Sommaire

#### Présentation pédagogique de la nature de la ressource et des moyens de la transformer en énergie utile.

La biomasse est le produit de l'activité de photosynthèse des plantes. Il s'agit de diverses catégories de produits carbonés : glucides (amidon, sucres : céréales, canne à sucre, betterave), lipides (acides gras estérifiés par du glycérol : colza, soja, palmier à huile) et de lignocellulose (bois, pailles). Ces produits fournissent une énergie utile lorsqu'ils subissent une combustion, directement ou après transformation.

Ils sont utilisés pour de nombreuses fonctions autres que l'énergie : l'alimentation, les matériaux (bois d'œuvre, bois d'industrie, etc.), la chimie dite « bio-sourcée ». Ces fonctions aboutissent à des déchets qui constituent aussi des sources d'énergie.

La ressource biomasse d'un territoire est limitée par la production annuelle d'un hectare de sol, diminuée de l'énergie nécessaire pour les procédés cultureux et industriels. C'est l'énergie nette, qui se situe dans la fourchette 1-3 tep/ha/an.

Les différentes sources de biomasse sont valorisées en énergie sous forme :

- de chaleur, par combustion directe du bois et d'autres biomasses sèches (souvent des déchets), dans des poêles pour les usages domestiques ou dans des chaudières pour alimenter des réseaux de chaleur pour le chauffage collectif ou des usages industriels.
- de carburant, appelé biocarburant, en substitution aux carburants d'origine pétrolière. Les biocarburants de première génération proviennent de denrées agricoles qui ont aussi un usage alimentaire. La seconde génération, au stade du prototype industriel, utilise tous les types de biomasse, tandis qu'une troisième génération, encore au stade de la recherche, tirerait parti d'algues marines.
- d'électricité, en cogénération de chaleur.

### **Variations dans le temps de la ressource : fluctuations, intermittence, risque d'épuisement.**

La biomasse est une ressource essentiellement renouvelable. Suivant une gestion raisonnée des sols, le prélèvement de biomasse correspond à sa production annuelle. Pour les plantes annuelles, la production suit le rythme annuel de la végétation, tandis que le bois des forêts s'accumule à long terme, sur une durée qui va de la décennie au siècle. Il n'y a donc pas d'intermittence à des échelles infra-annuelles. Les évolutions dans le temps peuvent provenir des phénomènes suivants :

- Les variations météorologiques entre années qui impactent fortement la production des espèces annuelles : sécheresse, inondations, etc. On peut y associer l'impact des maladies et des invasions d'insectes.
- La surexploitation des forêts qui ne laisse pas aux plantes le temps de se développer. Les forêts sont parfois détruites par déforestation.
- Les variations lentes de la fertilité des sols, qui peuvent provenir d'une gestion à courte vue, avec des risques comme la latéritisation ou la salinisation.
- Les compétitions dans les usages de la biomasse, car les besoins mondiaux augmentent pour l'alimentation, la chimie et les matériaux.

### **Investissements nécessaires : coûts et durée de vie.**

Les investissements sont de deux types. Il y a ceux qui permettent la production de biomasse : plantations forestières, irrigation. Ce sont des investissements à très long terme, d'ampleur très variable. Et il y a les investissements qui permettent d'effectuer la valorisation énergétique de la biomasse : poêles et chaudières, installations de cogénération, usines de production de biocarburant et de biométhane. Toutes ces installations vont du niveau domestique jusqu'aux énormes installations projetées pour la production de biomasse lignocellulosique. Leur durée de vie est de 20-30 ans.

### **Coût de production du kWh en fonctionnement, amortissement des investissements, traitement des déchets et démantèlement des installations.**

Le coût des investissements a été estimé de l'ordre de 3 000 €/tep-an pour la production de chaleur, et 2 000 €/tep-an pour la production de carburants. Le coût de fonctionnement, hors matière première, est de 360 €/tep pour la chaleur, et de 165-1000 €/tep pour les carburants. Le coût du transport est un élément important pour les grandes installations. Le coût de la biomasse est assez faible. Deux exemples : 230 €/tep pour le bois pour grande chaufferie, 480 €/tep pour le blé.

Les déchets sont parfois un handicap, comme dans les cendres de combustion, mais aussi souvent des sous-produits utiles : tourteaux utilisés en alimentation animale, glycérol pour la chimie, et les digestats de méthanisation pour la fertilisation des sols.

Le démantèlement des installations ne pose pas de problème particulier.

### **Emissions de CO<sub>2</sub> par kWh produit lors du fonctionnement, de la production et des activités aval.**

L'utilisation de biomasse est souvent considérée comme ayant un bilan CO<sub>2</sub> nul : celui-ci est prélevé dans l'air par le processus biologique (la photosynthèse) qui conduit à la formation de biomasse, et la combustion en émet une quantité égale. En réalité, il faut prendre en compte les GES émis lors des processus culturels et industriels :

- Le CO<sub>2</sub> émis pour la production des intrants agricoles, par les machines agricoles, le transport et les traitements industriels.
- Le N<sub>2</sub>O émis par les sols en conséquence de l'utilisation d'engrais azotés.
- Les GES émis du fait des changements d'affectation des sols, par exemple quand la promotion de biodiesel en Europe rend nécessaire la mise en culture de forêts tropicales pour la production d'huile de palme.

Le bilan réel est généralement bon. Dans le cas des biocarburants, les doutes ont conduit à la conduite d'ACV détaillées qui ont montré que le bilan pouvait être mauvais, voire désastreux. Quand la biomasse est importée de pays tropicaux, le bilan peut être plus mauvais que celui des produits pétroliers.

### **Conséquences des accidents et des pollutions sur la santé humaine**

Les conséquences les plus graves proviennent des émissions de particules et de gaz toxiques occasionnées par la combustion de biomasse. Deux cas doivent être évoqués :

- Les effets des fumées qui se dégagent lors de la mauvaise combustion de la biomasse, dans les pays pauvres. Agissant sur les voies pulmonaires et sur les yeux, au niveau des logements, elles causent de l'ordre de 1 million de décès prématurés chaque année.
- L'incinération des ordures ménagères a engendré l'émission de dioxines et autres polluants. Les équipements modernes évitent ces émissions, mais il convient de surveiller régulièrement la pollution des gaz émis.

### **Conséquences des accidents et des pollutions sur les écosystèmes**

L'utilisation de la biomasse énergétique a des conséquences faibles, a priori. Toutefois, sa production requiert des surfaces importantes, cultivées pratiquement en monoculture, ce qui peut avoir des conséquences importantes (à voir au cas par cas) sur la biodiversité, sur l'accès aux ressources en eau, et sur la pollution par les intrants agricoles.

---

Abréviations. kha, Mha : millier, million d'hectares.

Correspondances énergétiques : 1 t de matière sèche végétale moyenne donne 0,43 tep. 1 t de bois non sec (30% d'eau), soit environ 2 stères, fournit 0,29 tep PCI. La matière sèche est le produit d'un séchage à 70°C sous 30 millibars.

## 1. La biomasse et ses usages

La biomasse, prise au sens large, 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 » (article 29 de la loi de programme n°2005-781 du 13 juillet 2005). Cette définition mentionne ses trois sources principales : produits de la forêt, produits de l'agriculture, déchets.

Cette biomasse provient toujours de la conversion de l'énergie solaire par les végétaux chlorophylliens, selon le processus appelé photosynthèse. A l'échelle planétaire, les organismes photosynthétiques assimilent chaque année environ 100 milliards de tonnes de carbone. Et pourtant, le rendement de cette photosynthèse est inférieur à 1%. Une productivité annuelle de 30 tonnes de matière sèche organique par hectare (t MS/ha/an) est une valeur maximum, et la productivité moyenne de la forêt française est de 5,8 t MS (soit 2,5 tep)/ha/an de bois.

La biomasse peut répondre à des besoins très variés :

La nourriture des humains, que ce soit directement ou par le biais des animaux d'élevage.

L'énergie, sous les formes traditionnelles du bois (dit bois énergie), du charbon de bois et de la traction animale, et sous la forme plus moderne que sont les biocarburants.

Les matériaux : bois et isolants thermiques pour la construction, les textiles, l'ameublement, le papier... Ce que l'on appelle bois d'œuvre et bois d'industrie.

Les produits chimiques : produits pharmaceutiques, caoutchouc, produits du bioraffinage (en remplacement de la chimie basée sur les combustibles fossiles), etc.

La production de biomasse étant limitée par la surface de sols disponibles, on perçoit les difficultés qui vont résulter de la concurrence entre multiples usages légitimes. La production d'énergie est très généralement l'usage des sols qui est le moins valorisant au plan économique.

## 2. Caractéristiques de la biomasse par rapport aux autres ressources énergétiques

La biomasse est une source d'énergie renouvelable, fruit de l'action de la lumière solaire. En régime stationnaire, son bilan intrinsèque de CO<sub>2</sub> est nul : son usage entraîne, directement ou pas, le dégagement d'une quantité de CO<sub>2</sub> égale à ce qui a été capté dans l'atmosphère pour sa formation par photosynthèse. Le bilan effectif fait toutefois apparaître des émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) dues aux procédés agricoles et industriels nécessaires à sa production. Notons aussi que, si le bilan CO<sub>2</sub> théorique est nul dans le cas de cultures en assolement répétitif, il peut y avoir de fortes émissions de CO<sub>2</sub> lors de la mise en culture de prairies ou de forêts, par combustion de la matière organique stockée dans le sol et dans la partie aérienne de la végétation. Inversement, certaines formes de culture continue sur un même sol (prairies permanentes, accroissement d'une forêt) correspondent à un stockage progressif de quantités importantes de carbone, sous forme aérienne et souterraine, correspondant typiquement à 100 tonnes de CO<sub>2</sub>/ha.

Notons aussi que le caractère renouvelable de la biomasse suppose que la collecte annuelle soit inférieure à la production biologique. Sinon on assiste à une diminution progressive du stock existant.

Une autre caractéristique, c'est qu'il s'agit fondamentalement d'une énergie de flux, liée au flux de lumière solaire. Mais, pour la plupart des productions, cette énergie est stockée sur un temps de l'ordre de l'année, et parfois beaucoup plus dans le cas du bois dont la durée de vie peut être de

plusieurs siècles. Cette caractéristique différencie la biomasse de certaines énergies renouvelables électriques (éolien, solaire) qui sont intermittentes et non stockables.

En termes de risques, le problème essentiel provient des fumées qui, dans de mauvaises conditions de combustion, contiennent des composés organiques volatiles et des particules carbonées qui sont la source de maladies broncho-pulmonaires et ophtalmologiques. Au niveau mondial, les estimations de décès précoces vont de 1 à 2 millions par an, essentiellement dans les pays en développement.

### **3. Les besoins énergétiques que peut satisfaire la biomasse : chaleur, carburant, électricité.**

#### **3.1. Besoins de chaleur**

La biomasse, sous forme de bois énergie, de déchets agricoles comme les pailles, ou de déchets industriels, fournit de la chaleur par combustion directe. Pratiquée selon des méthodes traditionnelles, cette combustion a un très faible rendement (moins de 10% avec une cheminée à foyer ouvert), et elle peut être la source de sérieuses pollutions atmosphériques. Ces défauts sont réduits par un séchage convenable du bois et par l'utilisation de poêles et chaudières performants, dont le rendement thermique va jusqu'à 80%. Mais la quasi suppression de toute pollution, comme celle des dioxines, suppose un contrôle strict des températures de combustion au voisinage de 850°C, ainsi que la filtration et le traitement des rejets, ce qui n'est matériellement possible que pour les grosses installations, comme celles des réseaux de chaleur.

Le bois énergie peut répondre aux besoins de chaleur industrielle, de chauffage agricole, et de chauffage domestique et tertiaire, pour un apport d'environ 10 Mtep en France. Les maisons individuelles constituent un cas favorable pour le chauffage au bois, avec une association possible au chauffage solaire ou à la pompe à chaleur. La nécessité d'alimenter régulièrement le foyer amène, pour des usages continus en chauffage de base, à sélectionner des chaudières alimentées automatiquement en plaquettes et en granulés. Les immeubles et des équipements collectifs, y compris du secteur tertiaire, peuvent être chauffés par de grosses chaudières, qui ont un bon rendement thermique.

Le bois énergie est d'un prix intéressant. TTC et transport compris, il est en moyenne de 20 €/MWh PCI pour les plaquettes forestières des grosses chaufferies ; pour les particuliers les coûts sont de 27-55 €/MWh. [une stère vaut à peu près 1,7 MWh]

#### **3.2. Besoins de carburant pour les transports**

Les biocarburants trouvent leur source dans la biomasse. Ils se présentent actuellement sous la forme de dérivés de l'éthanol, ETBE en remplacement de l'essence, et de dérivés des huiles, EMHV, en remplacement du gazole. Ces carburants, appelés de première génération, sont obtenus à partir de produits agricoles à vocation traditionnellement alimentaire. En France, il s'agit du blé, de la betterave à sucre, du maïs, du colza et du tournesol. La canne à sucre et le palmier à huile sont utilisés dans les pays chauds, le maïs et le soja en Amérique.

Des carburants équivalents, appelés de seconde génération, peuvent être obtenus à partir de plantes entières, constituées majoritairement de celluloses et de lignine. C'est la raison pour laquelle cette filière, encore au stade pré-industriel, est appelée « ligno-cellulosique ». Une troisième génération pourrait provenir des huiles retirées des algues [il s'agit toutefois d'une technologie expérimentale car les coûts de production restent beaucoup trop élevés].

Les biocarburants sont déjà incorporés dans les carburants achetés à la pompe. De nombreux pays ont fixé des quotas minimums d'incorporation. En UE, le quota (en contenu énergétique) est de 5,75%, montant à 7% en 2020. En France, il est déjà de 7% (incorporation actuelle de 2,8 Mtep en

énergie brute, soit au mieux 1,8 Mtep en net, après soustraction de l'énergie des procédés), avec un objectif de 10% avant 2020. Les milieux agricoles y trouvent un débouché rentable pour leurs productions, mais cette filière bénéficie de subventions de la part de l'Etat ou des consommateurs.

Autre carburant, le gaz naturel véhicule, constitué de méthane, peut être remplacé par du biogaz, obtenu par fermentation anaérobie de biomasse, déchets humides ou plantes herbacées. Selon des études en cours, le même méthane pourrait être obtenu à partir de bois par voie thermo-chimique. Dans tous les cas, la nécessaire purification du gaz est une contrainte technique et économique forte.

### 3.3. Besoins d'électricité

La production d'électricité seule à partir de biomasse se fait avec un coût élevé. Elle n'est pas justifiée en base. Il y a toutefois une exception qui mériterait d'être étudiée : le bois étant une énergie stockée, il pourrait répondre aux pointes hivernales ou estivales de consommation électrique, en remplacement du fioul ou du charbon.

Actuellement, il y a une petite production d'électricité par cogénération, en réponse à des appels d'offres de la Commission de régulation de l'énergie. Cette électricité bénéficie d'un tarif d'achat favorable. Cela n'a de sens que si la biomasse est bon marché et si la chaleur est bien utilisée, en réponse à des besoins permanents.

Les déchets ménagers sont d'ores et déjà utilisés dans des usines d'incinération, avec réseau de chaleur pour le chauffage urbain ou industriel.

La cogénération peut aussi se faire par combustion de biogaz. Cela peut correspondre à la situation d'industries agroalimentaires qui doivent se débarrasser de quantités importantes de déchets humides, et qui ont des besoins combinés d'électricité et de chaleur. Le biogaz produit dans des exploitations agricoles peut aussi donner lieu à cogénération, à la condition d'un très bon usage de la chaleur.

La production actuelle française d'électricité à partir de biomasse est de 4 TWh.

## 4. Les trois sources de biomasse : la forêt, l'agriculture, et les déchets industriels et ménagers.

### 4.1. Produits de la forêt et besoins énergétiques

Les 15,5 Mha de la forêt française ont une production biologique annuelle d'environ 135 Mt, ce qui correspond, en valeur énergétique brute, à 2,5 tep/ha/an. Elle est utilisée comme suit :

19 Mt de bois d'œuvre sous forme de grumes ; après ouvrage, il reste 10 Mt, et 9 Mt de déchets utilisés pour la fabrication d'agglomérés, ou comme source d'énergie (production de pellets ou de granulés pour le chauffage) ;

11 Mt de bois d'industrie (papeterie, panneaux d'agglomérés) ;

24 Mt, soit 7,0 Mtep, de bois-énergie (bûches), dont 6 Mtep en autoconsommation ;

21 Mt de rémanents, qui restent en forêt après l'abattage ;

60 Mt qui ne sont pas valorisées (forêts sous-exploitées ou non récoltables car difficilement accessibles, forêts d'agrément).

En fin de vie, les bois de construction, les palettes et les meubles sont récupérables, ce qui peut constituer une ressource importante (bois de récupération), théoriquement égale à la quantité de bois d'œuvre. Ils représentent 6 Mt actuellement. Une bonne part de ces bois sont « souillés » par des

traitements divers, et ils sont difficilement exploitables, sauf brûlés dans des usines d'incinération équipées en contrôle de combustion et en traitement des rejets. Plus généralement, il faut noter que tous les produits de la forêt peuvent avoir une double vie. Un premier usage, qui conserve les biomolécules, dans la construction, l'ameublement, les papiers et cartons, la chimie, etc. et ensuite, s'ils sont bien récupérés, une valorisation énergétique par combustion, avec dégradation moléculaire et production de CO<sub>2</sub>.

La filière bois française est lourdement déficitaire, ce qui traduit une mauvaise adaptation de la forêt aux besoins du pays. Ainsi, l'industrie française de la scierie est très faible, par manque de parcelles vastes et monospécifiques, susceptibles d'une exploitation rentable.

Le bois est appelé à jouer un rôle croissant dans le bâtiment, comme bois de construction, comme isolant thermique, etc. C'est autant de carbone stocké durablement. La chimie fera de plus en plus appel au bois, avec les bioproduits, les tissus, et la « chimie verte » produisant des monomères à partir de lignine et de celluloses.

Il y a en France 9 Mha de taillis peu productifs qui pourraient évoluer vers de la forêt de gros bois, ou être cultivés sous forme de taillis à courte rotation (TCR). A l'inverse de la forêt traditionnelle, il s'agit ici de « cultiver » des arbres (saule, peuplier,...) qui sont coupés au bout de 3 à 10 ans. Les souches repoussent en taillis pour une nouvelle coupe. Le bois ainsi récolté peut servir à la papeterie, à la production de plaquettes forestières ou pour les biocarburants de seconde génération. Sur sol riche, avec une bonne ressource en eau, la production peut être de 10 à 12 t MS/ha/par an sur 8 ans (soit 4 à 5 tep/ha/an).

#### 4.2. Produits de l'agriculture et besoins énergétiques

La biomasse produite par l'agriculture, ce sont d'abord des molécules, pas de l'énergie. Sa vocation essentielle est de nourrir les humains. Mais il est traditionnel que l'agriculture produise bien d'autres choses et, depuis quelques décennies, elle est subventionnée pour produire aussi des biocarburants pour véhicules automobiles.

En principe, les biocarburants répondent à l'objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux carburants d'origine fossile. Leur bilan est mauvais à cet égard, à cause des engrais azotés employés pour la culture et de l'énergie requise pour tous les procédés, qui provient souvent de combustibles fossiles. Un autre facteur est à prendre en compte dans le cas où le biocarburant ou sa matière première est importé. Cette demande induit souvent le défrichement de sols occupés par des forêts ou des prairies, source de fortes émissions de CO<sub>2</sub>. Cet effet, appelé changement d'affectation des sols (CAS), peut ruiner complètement l'intérêt du biocarburant en matière de gaz à effet de serre. C'est le cas pour le biodiesel, puisqu'une bonne partie de ce qui est utilisé chez nous pour répondre au quota de 7% provient d'huiles importées.

Productions nationales (métropole) et rendement énergétique moyen des cultures destinées aux biocarburants (rendement net : après soustraction de l'énergie des procédés).

Données 2009	Surfaces (ha)	Production d'EMHV tep	Rendement brut d'EMHV tep/ha	Rendement net tep/ha
Colza	861 000	959 000	1,11	0,605
Tournesol	118 000	97 520	0,826	0,45

Données 2009	Surfaces (ha)	Production d'éthanol tep	Rendement brut d'éthanol tep/ha	Rendement net tep/ha
Betterave	27 500	153 000	5,56	2,29
Blé	105 000	144 000	1,37	0,564

L'apport énergétique effectif de nos biocarburants est faible. La mise en œuvre du quota de 7% n'apporterait au mieux qu'un total net de 1,8 Mtep, à comparer à la consommation de 41,2 Mtep de combustibles fossiles pour les transports, soit 4,3%.

La seconde génération de biocarburants est basée sur l'utilisation de la lignocellulose des plantes, une matière produite en quantité plus importante que les matières premières alimentaires utilisées pour les biocarburants actuels. Elle pourrait provenir de cultures dédiées à forte productivité : des herbes pérennes comme le miscanthus (15 t MS/ha/an), des cultures annuelles comme le sorgho ou le triticale, ou du bois de taillis à courte rotation (12 t MS/ha/an pour le peuplier). On peut aussi utiliser divers types de bois comme les rémanents d'exploitation.

Pour cette seconde génération, deux filières industrielles sont à l'essai : la voie liquide, produisant de l'éthanol après hydrolyse de la lignocellulose et la voie thermochimique qui vise à produire du gazole. La voie liquide est semblable à la filière actuelle de production de bioéthanol, mais avec plusieurs obstacles techniques : difficulté d'hydrolyser la lignocellulose, mauvaise adaptation des levures à la fermentation des dérivés des hémicelluloses, mauvais usage de la lignine. Il est envisagé d'intégrer les usines à des complexes de bioraffinage. La voie thermochimique part d'une biomasse sèche, qui est d'abord gazéifiée avec formation d'un mélange de CO et H<sub>2</sub>. Ces gaz sont alors la base d'une synthèse d'hydrocarbure par la méthode de Fischer-Tropsch, une méthode classique utilisée pour produire du carburant liquide à partir de charbon. Il est toutefois nécessaire, pour des raisons économiques, de disposer de très grosses usines traitant de l'ordre de 400 kt de bois par an. Sur la base d'une ressource de 12 Mt MS (soit 5,2 tep)/ha/an, on pourrait obtenir, en énergie finale de carburant, de l'ordre de 2 tep/ha/an par voie thermochimique (rendement de 38%) et de 1,4 tep/ha/an par voie liquide (rendement de 27%). Avec la voie thermochimique, la production de carburant Fischer-Tropsch peut être augmentée, jusqu'à triplée, par addition de chaleur, d'électricité ou d'hydrogène exogènes, ce qui donne de la souplesse d'usage à la filière. [thèse de C. Hohwiller, Mines ParisTech, 2011].

### 4.3. Déchets

Les déchets sources d'énergie appartiennent à trois catégories : ménagers, agricoles, et industriels.

#### *Déchets ménagers*

Les déchets ménagers fournissent de l'énergie de deux façons :

-- par incinération, avec production de chaleur et souvent aussi d'électricité, en cogénération. La production annuelle est de 1,2 Mtep. Ce chiffre représente la moitié de la production car, par convention, les déchets renouvelables constituent la moitié du total. Le reste est constitué de matières plastiques synthétisées à partir de produits pétroliers.

-- par production de biogaz en décharge contrôlée ; 0,3 Mtep actuellement.

#### *Déchets agricoles*

Les exploitations agricoles produisent des déchets qui peuvent être valorisés comme sources d'énergie : pailles, autres restes de récolte, fumier et lisier. Leur disponibilité est faible car une bonne

part est (ou devrait être) retournée au sol pour maintenir sa teneur de humus. Les déchets agricoles fournissent actuellement 0,2 Mtep. L'extension de la production de biogaz par méthanisation pourrait contribuer à résoudre un problème écologique majeur, l'épandage des lisiers d'élevage.

### ***Déchets industriels***

En termes énergétiques, les plus importants proviennent des industries agricoles et alimentaires : amidonneries, distilleries, conserveries, etc. Les déchets secs (coques et noyaux, farines animales,...) peuvent servir de combustibles et les déchets humides de substrat pour la production de biogaz. Les graisses animales sont un substrat pour produire du biodiesel. Les boues résiduelles de traitement des eaux sont une autre source, permettant de produire du biogaz.

### **4.4. Le biogaz.**

Quand de la biomasse est placée en conditions anaérobies, c'est-à-dire en absence d'oxygène, dans de grandes cuves appelées digesteurs, elle est dégradée par des bactéries méthanogènes. C'est la méthanisation. Il se dégage ce qu'on appelle le biogaz, et il reste un « digestat » riche en azote et en minéraux, utilisable comme fertilisant. En gros, le biogaz est constitué de 55% de méthane, ainsi que de gaz variés, dont 30% de CO<sub>2</sub>, de la vapeur d'eau, de l'azote et des polluants divers, comme H<sub>2</sub>S, l'ammoniac, etc. Sa teneur en méthane en fait un bon combustible, mais il doit être purifié pour la plupart des applications.

Au plan énergétique, le biogaz renferme une proportion mal connue et variable de l'énergie de la biomasse de départ. Sans doute entre 50 et 60%.

Le biogaz obtenu à partir de toutes sortes de déchets a un potentiel limité car la quantité de déchets ne devrait pas augmenter. Il est aussi possible de cultiver des végétaux pour approvisionner des digesteurs. En Allemagne, 600 kha de maïs fourrager sont cultivés à cette fin. Ces productions sont fortement subventionnées par le biais d'un tarif d'achat du biométhane ou de l'électricité produite par sa combustion. Pour des cultures dédiées à la production de biogaz, d'autres espèces sont possibles, comme la luzerne ou la fétuque. Leur rendement optimum serait d'environ 12 t MS/ha, soit 5,2 tep/ha. Si le rendement énergétique de production de biogaz est de 58%, on obtiendrait ainsi 3,0 tep/ha de combustible. C'est un rendement brut, dont il faut déduire l'énergie des procédés, qui est d'environ 50%, d'où une production nette de 1,5 tep/ha. On voit donc ici une filière qui pourrait concurrencer les biocarburants liquides ou, par réinjection dans le réseau de gaz naturel, limiter les besoins de ce dernier. Son bilan environnemental reste à faire, en tenant compte des CAS.

## **5. Conclusions**

En 2050, la production française de biomasse énergétique pourrait être de 31 Mtep net (12 Mtep en 2010). Mais cela nécessitera bien des efforts.

Pour la biomasse forestière, notre filière bois, y compris pour ses usages énergétiques, ne se développera que si le bois devient compétitif, ce à quoi contribuera l'augmentation du prix des combustibles fossiles, incluant une taxe carbone.

Pour la biomasse agricole, le problème essentiel sera celui de l'acceptation d'intégrer de grands secteurs de production énergétique dans le paysage agricole : taillis à courte rotation, cultures énergétiques de graminées pérennes, cultures pour la production de biogaz. Les biocarburants actuels offrent un bilan très insuffisant (bilan gaz à effet de serre, production nette d'énergie par hectare), et de nombreuses incertitudes subsistent quant à la rentabilité, au rendement énergétique et à l'impact environnemental des filières de biocarburants lignocellulosiques. Les études actuelles montrent qu'elles gagneront à être intégrées avec la bio-raffinerie et que leur rendement de carburant par hectare sera amélioré par l'utilisation d'hydrogène et de chaleur allogènes.

Les déchets doivent être valorisés au mieux, mais il semble clair que leur potentiel devrait plutôt stagner, à l'exception notable des bois de récupération quand ils seront techniquement utilisables sans pollution de l'air. Il est essentiel de voir concrètement les meilleures manières de tirer partie des déchets : bien valoriser la chaleur, ne pas négliger les atouts de l'incinération avec cogénération. La méthanisation n'est pas toujours la bonne solution. Et il ne faut pas oublier la nécessité qu'une partie des déchets soit retournée au sol pour maintenir sa fertilité.

Il semble inévitable que les affectations de la biomasse soient régulées essentiellement par le marché, ce qui nécessite l'institution d'une taxe carbone d'un montant significatif, qui pourrait être élargie en une taxe sur les GES si les émissions de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O pouvaient être suivies correctement. Par ailleurs il faudrait une utilisation limitée et bien conçue des subventions, pour que l'argent public soit bien utilisé, avec des critères comme la tonne de CO<sub>2</sub> évitée, la mise au point de technologies efficaces, la constitution d'une industrie nationale : scierie, bio-raffinerie, équipements de production de biogaz et de biocarburants de seconde génération, utilisation du bois dans la construction, etc.

Tableau indicatif de l'usage des sols (en Mha) et de la production primaire nette de biomasse énergétique (BME) (en Mtep), pour la France métropolitaine.

Ressource BME	Surfaces 2010	BME 2010	Surfaces 2030	BME 2030	Surfaces 2050	BME 2050
1 Forêts et divers	15,5	9,0	13,5	10,5	12	12,0
2 Taillis,TCR, graminées pérennes	0	0	2	4	3	6
3 Terres cultivées pour biocarburants 1ère génér.	1,2	0,8	0,4	0,4	0	0
4 Terres cultivées pour biogaz	0	0	1,0	1,5	2,0	3,0
5 Terres cultivées pour bioproduits	0,5	0	1,5	1,5	3,0	3,0
6 Terres cultivées pour alimentation	13,2	0	13,2	0	13,2	0
7 Prairies	12,8	0	11,1	0	8,9	0
8 Déchets urbains renouvelables	0	1,2	0	1,5	0	2,0
9 Résidus agricoles et IAA	0	0,4	0	0,6	0	0,8
10 Bois de récupération	0	1	0	2,0	0	4
11 Terrains artificialisés	7,3	0	7,9	0	8,5	0
Totaux	50,6	12,6	50,6	22,0	50,6	30,8

Remarques sur les lignes du tableau.

1. La surface diminue du fait du développement des TCR et des terrains artificialisés. Collecte plus systématique des rémanents. La cohérence de la production peut être vérifiée en

supposant que la production biologique de la forêt française passe en moyenne de 2,5 à 3 tep/ha/an, que 40% de la production biologique est consacrée à l'énergie, et que le rendement énergétique des procédés est de 80%.

2. La surface actuelle est négligeable. Développement par remplacement de taillis mal gérés (forêts). Utilisation pour la production de chaleur et de biocarburants ligno-cellulosiques, y compris le biométhane obtenu par voie thermochimique.
3. Extinction progressive des biocarburants de 1ère génération. BME : production nette, sur la base des rendements de Ademe / France Agrimer 2010.
4. Extension surtout au détriment des prairies (surtout temporaires). BME : production nette, sur la base de 1,5 tep/ha (voir étude GDF Suez / IFP / Ademe). Biogaz essentiellement injecté dans le réseau. Ceci est dans l'hypothèse où la production de biogaz présentera un bon bilan énergétique. Sinon, ces surfaces serviront pour des TCR ou des graminées pérennes, avec un bilan analogue.
5. La BME est produite sous forme d'une augmentation des déchets industriels et ménagers, et par valorisation des produits en fin de vie (hypothèse de 2 tep/ha et 50% d'énergie de déchets).
6. Déchets inclus dans les postes 9 (déchets urbains) et 10 (déchets agricoles et IAA).
7. Faible diminution, par pertes de prairies temporaires et extension des terrains artificialisés.
8. Petite augmentation des rendements, mais quantités en faible diminution. Biogaz et incinération avec cogénération. Production nette.
9. Légère augmentation du rendement de transformation. Biogaz et chaleur. Production nette.
10. Augmentation progressive du taux de récupération. Utilisation pour bois de feu industriel (chauffage et électricité de pointe) et biométhane.
11. Division par deux du rythme d'augmentation par rapport au passé récent, soit 30 000 ha/an.

Surface de prairie : variable d'ajustement. Perte progressive de prairies par : 1/ Diminution des prairies temporaires, remplacées par des cultures dédiées pour biogaz (mélanges légumineuses (trèfles), graminées (fétuques, ray-grass) fonctionnant avec faible apport d'azote) et des cultures pour bioproduits. Cette diminution est rendue possible par un moindre besoin de fourrage si le cheptel bovin diminue. 2/ Diminution des prairies permanentes peu productives.