

Quelles ressources en biomasse pour un système énergétique durable ?

La biomasse est aujourd'hui la première ressource énergétique renouvelable sur la planète. De plus, son introduction dans les systèmes énergétiques présente des avantages certains en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre. La mobilisation de la biomasse reste, néanmoins, sujette à de nombreux enjeux en termes de compétition d'usages et de gestion des ressources naturelles environnantes (eau, sol, biodiversité, etc.), impliquant un besoin de structuration des filières pour permettre une valorisation réellement durable de la ressource.

Si le 20^e siècle a été le théâtre de la croissance du pétrole en tant que principale source d'énergie, le 21^e siècle devrait faire entrer en scène un nouveau mix énergétique composé d'une part importante d'énergies renouvelables, avec une place de choix pour les bioénergies.

Les bioénergies regroupent l'ensemble des énergies produites à partir de biomasse. Celle-ci est constituée de l'ensemble des organismes vivants sur les continents et dans les océans, qu'ils soient des micro-organismes, des plantes ou des animaux.

Historiquement, l'usage de la biomasse comme source d'énergie a accompagné l'humanité depuis la découverte du feu. Le bois de feu ou la combustion de déchets organiques représentent encore une part importante de source de chaleur dans certaines zones encore peu industrialisées (tableau 1).

Ce n'est que depuis quelques décennies que des technologies de conversion de la biomasse plus modernes et plus efficaces se sont développées. Les épisodes de fortes hausses des prix du pétrole, ainsi que la volonté d'une moindre dépendance aux ressources fossiles, ont suscité les premières innovations au cours du siècle dernier, comme les véhicules gazogène au bois en temps de guerre et l'huile végétale utilisée la première fois par Rudolf Diesel à la fin du 19^e siècle.

Le mouvement s'est alors considérablement accentué depuis que le pétrole est entré dans ses dernières décennies de suprématie, que son prix a périodiquement atteint des niveaux records et que le changement climatique est devenu une préoccupation environnementale planétaire.

Tableau 1

Différents usages commerciaux du bois et part relative des usages énergétiques traditionnels en 2007

	Bois rond récolté 2007 (Mm ³)	Dont bois de sciage (Mm ³)	Dont bois de papeterie (Mm ³)	Dont bois de panneau (Mm ³)	Dont bois de chauffage (Mm ³)	Part du bois de chauffage
Monde	3 591	1 007	354	266	1 886	53 %
Dont Europe	729	330	102	84	153	21 %
Dont Amérique du Nord	640	386	149	56	54	8 %
Dont Amérique du Sud	366	82	36	15	194	53 %
Dont Asie	1 027	150	55	105	787	77 %
Dont Afrique	672	25	6	3	603	90 %

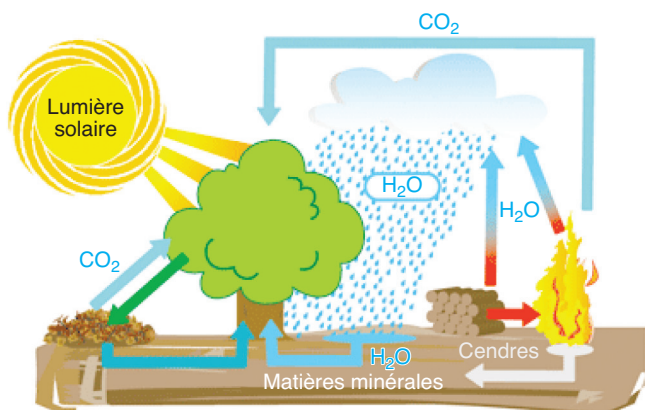
Source : FAO/STAT

Quelles ressources en biomasse pour un système énergétique durable ?

Les principaux atouts de la biomasse

La biomasse représente la première ressource renouvelable à l'échelle du globe, devant l'hydraulique, le solaire et l'éolien. La biomasse, et en particulier la biomasse végétale, présente l'immuable intérêt d'avoir recours à la photosynthèse pour sa croissance. Elle utilise l'énergie solaire, pour décomposer l'eau qu'elle contient dans ses cellules, et le CO₂ de l'atmosphère, pour les transformer en matières végétales, principalement des hydrates de carbone, dont la cellulose.

Grâce à ce processus, le CO₂ émis dans l'atmosphère lors de la conversion d'une matière végétale en énergie peut être considéré comme neutre vis-à-vis du bilan carbone.



Ainsi, lors de la combustion d'un mélange essence-bioéthanol dans un moteur, seul le CO₂ fossile (et autres gaz impliqués dans le réchauffement global : CH₄, N₂O, etc.) est comptabilisé comme contribuant à l'effet de serre sur l'ensemble de la chaîne ; par exemple lors des étapes de production et de combustion de l'essence ou lors des étapes de culture du végétal (production d'engrais, utilisation d'engins agricoles, etc.). Un combustible 100 % biomasse issu d'une plante peu exigeante en intrants agricoles peut ainsi très significativement réduire la contribution à l'effet de serre.

Un large éventail de ressources et de nombreuses voies de valorisation

La biomasse valorisable en énergie peut être de nature très diverse. Quatre grandes familles de ressources peuvent néanmoins être distinguées.

Les cultures dédiées alimentaires pour la production de biocarburants de première génération

À l'origine du développement des biocarburants de type biodiesel (ou ester méthylique d'huile végétale) et éthanol

en Europe (figure 1), outre la recherche de carburants plus propres se substituant aux carburants fossiles, la plupart des cultures agricoles en vue étaient en quête d'une diversification de leurs débouchés, compte tenu de secteurs de valorisation alimentaire peu porteurs. C'est alors que le colza, la betterave sucrière et certaines céréales se sont positionnés sur ces nouvelles filières. Par ailleurs, la valorisation des grains permet la production de coproduits comme les drèches pour les céréales, et les tourteaux pour les oléagineux. Ces derniers sont très prisés en alimentation animale, en particulier par les nombreux pays déficitaires et importateurs de tourteaux de soja américains comme la France. Les filières éthanol et biodiesel se sont alors plus largement développées grâce à la mise en place de politiques et de mesures incitatives pour les producteurs et les distributeurs. Le modèle s'est également répandu aux États-Unis avec la production d'éthanol de maïs et de biodiesel de soja. L'Asie a, pour sa part, développé une filière biodiesel issue du palmier à huile en réponse à une demande croissante de biodiesel en Europe ; profitant ainsi d'une ressource en palme en plein essor, initialement tirée par le secteur alimentaire (tableau 2).

Tableau 2

Part des différentes cultures mobilisées pour l'énergie vis-à-vis de la production totale en 2007

	Récolte totale 2007 (Mt)	Part dédiée aux bioénergies 2007
Blé	606	0,3 %
<i>dont UE</i>	120	1 %
Maïs	792	13 %
<i>dont États-Unis</i>	331	20 %
Colza-Tournesol	77	17 %
<i>dont UE</i>	23	51 %
Soja	221	1 %
<i>dont Amérique du Sud</i>	114	2 %
Palmier à huile	193	0,2 %
<i>dont Asie</i>	165	0,3 %
Betterave à sucre	247	4 %
<i>dont UE</i>	115	8 %
Canne à sucre	1 591	15 %
<i>dont Amérique du Sud</i>	641	37 %

Source : FAOSTAT, FAPRI

Ces filières ont cependant été confrontées à d'importantes controverses et voient aujourd'hui certains freins à la poursuite de leur croissance, avec la limitation de la disponibilité des ressources, l'apparition de phénomènes de compétition d'usages et d'impact sur les marchés des matières premières, et le renforcement des exigences de réduction des gaz à effet de serre vis-à-vis

Quelles ressources en biomasse pour un système énergétique durable ?

des filières fossiles. La filière éthanol de canne à sucre, très largement développée au Brésil notamment, pionnière et longtemps première filière de production d'éthanol, reste aujourd'hui une des voies les plus efficaces en termes de bilan énergétique et environnemental, tant que la culture de canne est implantée sur une terre initialement agricole.

Vers le développement de nouvelles ressources oléagineuses

Les deux technologies actuellement commercialisées pour la production de substituts aux carburants de type diesel sont les esters méthyliques d'huiles végétales et les huiles végétales hydrotraitées. Le second produit présente l'avantage supplémentaire de pouvoir être utilisé dans l'aviation en mélange au kérosène. De manière à limiter les contraintes de compétition d'usages, des espèces productrices d'huile, jusqu'alors peu exploitées, sont à l'étude. On compte parmi elles le jatropha, la caméline, le cynara, pour la plupart adaptées aux climats méditerranéens à semi-arides. D'importants programmes d'implantations ont été lancés, notamment pour la culture du jatropha, principalement en Asie et en Afrique centrale. Des tests en vols de carburéacteurs comportant une part d'huile de jatropha et/ou de caméline hydrotraitée ont récemment été réalisés par différentes compagnies aériennes.

Ces tests de nouveaux carburéacteurs ont également inclus le mélange d'un nouveau type d'huile, de l'huile algale extraite de cultures de micro-algues. Il s'agit encore d'une nouvelle voie, aujourd'hui exploratoire, de production d'huile à partir de biomasse, non plus terrestre mais aquatique. Elle consiste à sélectionner des espèces de micro-algues capables de se reproduire très rapidement, puis de produire et stocker des lipides dans leurs cellules en conditions de culture maîtrisées. Ces cultures d'algues peuvent être réalisées en bassin ouvert comme en réacteur fermé, en eau douce comme en eau de mer selon les espèces, et nécessitent un accès à la lumière, un apport de CO₂ et quelques éléments nutritifs (azote, phosphore) afin de croître, comme les plantes supérieures, grâce à la photosynthèse. De tels systèmes pourraient permettre des productivités en biomasse de 30 à 80 tonnes de matière sèche à l'hectare par an, avec une production d'huile de 8 à 35 t/ha/an, soit un rendement jusque 25 fois plus élevé que le colza. Néanmoins, il n'y a aujourd'hui pas de retour d'expérience à échelle industrielle et les étapes de culture, récolte et extraction d'huile comportent encore des verrous techniques et économiques importants pour une production commerciale d'huile algale à destination des filières carburants.

Les sous-produits des activités agricoles, forestières, industrielles et urbaines

D'importantes quantités de sous-produits et déchets organiques ne pouvant être recyclés peuvent potentiellement être intégrées dans un système de valorisation énergétique. C'est aujourd'hui le cas avec une part importante des unités d'incinération des déchets en France permettant la récupération de chaleur. Le pourcentage de biomasse dans la charge de déchets reste néanmoins variable et limité. Certaines agglomérations, industries et agriculteurs ont par ailleurs fait le choix de la méthanisation pour valoriser la fraction fermentescible de leurs déchets organiques. Déchets verts, effluents d'élevage, résidus de laiterie et autres déchets d'industries agroalimentaires peuvent ainsi permettre la production de biogaz pour la génération de chaleur, d'électricité, voire de carburants pour des flottes de véhicules dédiées.

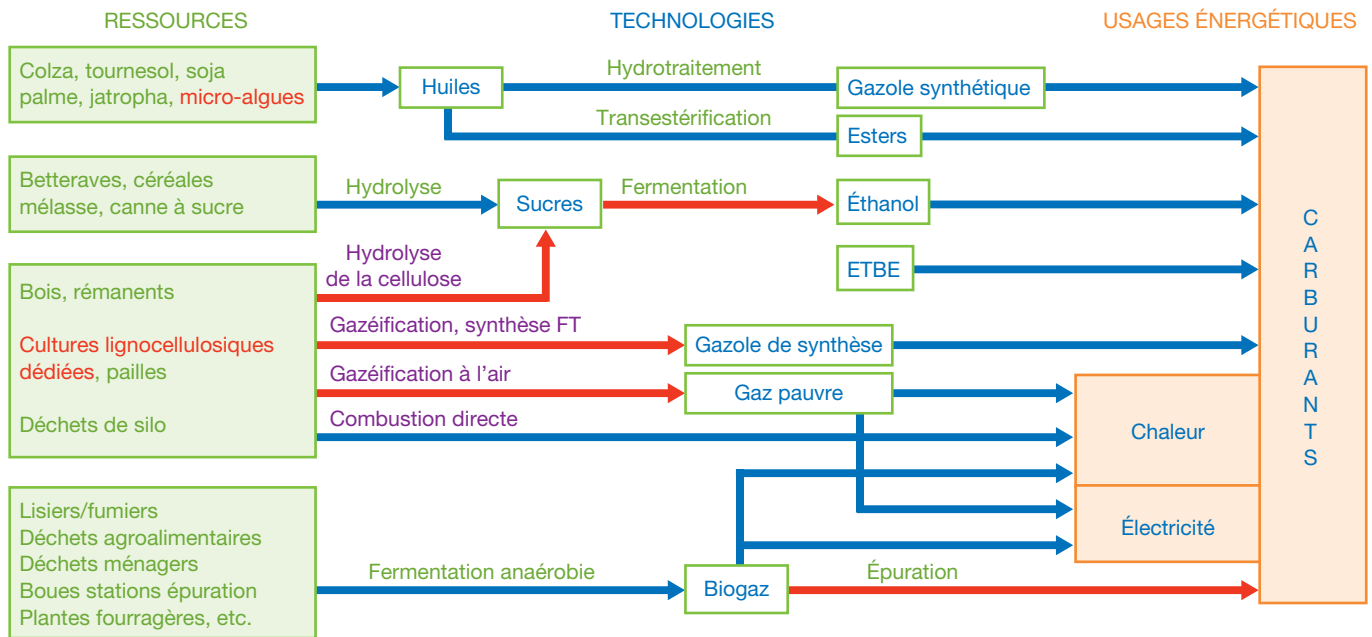
D'autres sous-produits, plus secs, comme les résidus de scieries, rémanents forestiers et surplus de pailles peuvent être conditionnés pour alimenter des chaudières de tailles domestiques à collectives/industrielles. En 2006 en France, on comptait respectivement 7,4 et 2 Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole) de chaleur ex-biomasse dans ces secteurs, générés essentiellement à partir de bois. À l'horizon 2020, les objectifs du Grenelle prévoient une multiplication par quatre de la production de chaleur biomasse dans les secteurs collectifs/industriels, ainsi qu'un fort développement de la cogénération biomasse pour la production de près de 4 Mtep de chaleur et d'électricité. En ce sens, des mesures nationales et locales sont dorénavant en place et à venir (appels d'offre de la CRE¹, Fonds chaleur, révision des tarifs de rachat d'électricité, etc.).

Sous réserve de disponibilité à échéance, ces sous-produits des secteurs agricoles et forestiers pourraient également contribuer à la production de biocarburants de deuxième génération. Aujourd'hui en cours de recherche et développement à l'échelle pilote, ces nouvelles filières sont en mesure de produire soit de l'éthanol à partir de la cellulose (constituant des parois cellulaires de la biomasse) soit un gazole de synthèse par gazéification de la biomasse totale (figure 1). Les rendements énergétiques de ces deux voies sont aujourd'hui similaires. Compte tenu des objectifs ambitieux fixés par la Commission européenne et au niveau national en termes de mobilisation de la biomasse pour la production de chaleur, d'électricité et de biocarburants, des ressources énergétiques dédiées s'avèreraient incontournables pour faciliter l'approvisionnement des futures installations.

[1] CRE : Commission de régulation de l'énergie

Quelles ressources en biomasse pour un système énergétique durable ?

Fig. 1 - Les différentes voies de valorisation énergétique de la biomasse



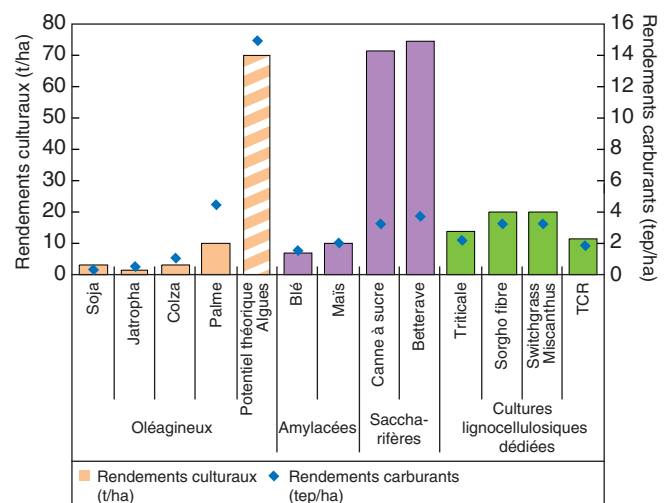
Source : IFP

Les nouvelles cultures énergétiques dédiées lignocellulosiques

En réponse à une demande croissante et de manière à appréhender l'approvisionnement d'importantes quantités de biomasse vers des unités de production de carburants, un certain nombre d'espèces ont été sélectionnées pour leur forte productivité en biomasse et leurs faibles exigences relatives en intrants. Ces espèces peuvent être des cultures annuelles actuellement présentes dans les systèmes de culture, comme la triticales en plante entière, céréale rustique hybride du blé et du seigle, constituée de tiges hautes et rigides, ou encore une variété de maïs ou de sorgho fibre à forte productivité en biomasse, cultivées spécifiquement. D'autres espèces pérennes, moins connues, sont à l'étude en parcelles expérimentales de manière à en définir les itinéraires techniques adaptés, à appréhender leur intégration dans les systèmes agricoles et à évaluer leurs impacts sur l'environnement et les écosystèmes existants. Parmi ces cultures on compte le miscanthus, le switchgrass, la canne de Provence, qui présentent la particularité d'atteindre des rendements de 12 à 25 tonnes de matière sèche à l'hectare selon les conditions et de permettre une récolte annuelle pendant une période d'au moins dix ans à partir d'un même et unique plant. Un tel système limite significativement les interventions sur parcelle, qui se résument à la gestion des mauvaises herbes et à un éventuel apport minéral à l'implantation.

Parmi les espèces pérennes, des cultures d'arbres en taillis à croissance rapide (TCR) sont également expérimentées. Il s'agit, pour la plupart, d'essences feuillues comme le peuplier, le saule, l'eucalyptus, et plus récemment étudié le robinier, capables de rejeter des souches et d'atteindre des productivités importantes (figure 2) permettant des coupes tous les sept ans, voire tous les trois ans pour les rotations les plus courtes.

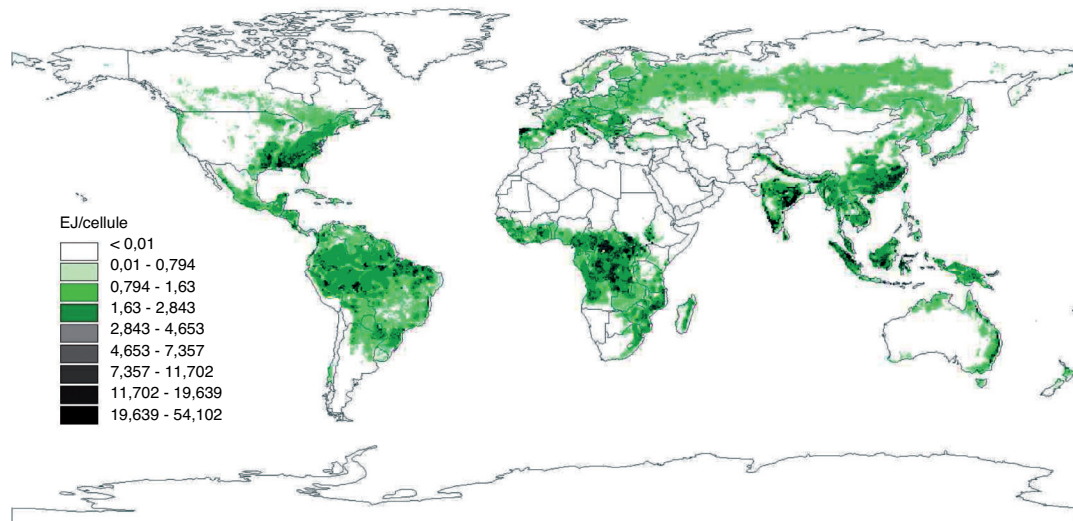
Fig. 2 - Rendements agricoles et de conversion des différentes ressources biomasse



Source : IFP

Quelles ressources en biomasse pour un système énergétique durable ?

Fig. 3 - Potentiel cumulé de production de biomasse pour les bioénergies entre 2000 et 2011, en EJ/cellule



Source : IIASA, 2006

Si la valorisation des sous-produits et déchets semble permettre l'approvisionnement de filières énergétiques à court terme, divers autres types de biomasse sont actuellement à l'étude afin d'assurer la pérennité des filières bioénergies actuelles et le développement de nouvelles filières potentiellement plus durables. Il faut néanmoins noter que si le gisement potentiel de cette biomasse peut être très important, sa mobilisation est soumise à divers enjeux.

Des gisements importants, mais une mobilisation à enjeux multiples

Le stock terrestre de biomasse est de l'ordre de 2 000 Gigatonnes (Gt). Néanmoins, une utilisation "soutenable" de la biomasse à usage énergétique ne doit pas faire appel à ce stock, mais au flux annuel de production de biomasse. Selon José Goldenberg (2000), sur les 220 Gt de biomasse produits annuellement dans le monde, 13 Gt pourraient être utilisables pour la production d'énergie (tableau 3). Aujourd'hui on consomme 27 % de ce potentiel, dont 22 % en bois énergie. Le flux de biomasse restant potentiellement mobilisable pour l'énergie est essentiellement constitué de produits de forêts sous-exploitées, de surplus et sous-produits agricoles et de résidus de l'industrie du bois. Par ailleurs, si la plupart des pays industrialisés sont limités dans le développement de leur surfaces agricoles, certaines zones montrent un potentiel de surfaces mobilisables encore significatif. Ce sont, notamment, les différentes conditions pédoclimatiques rencontrées à travers le monde qui impliquent ainsi des inégalités pour l'accès à la ressource (figure 3).

En effet, en Asie on compte aujourd'hui peu de surfaces potentiellement disponibles à court terme pour l'implantation de nouvelles cultures, mais le gisement de sous-produits forestiers et agricoles est significatif, avec plus de 40 Mtep mobilisables à court terme, notamment en Chine et en Inde (USAID, 2009). En Afrique comme en Amérique du Sud, la forêt est en mesure de fournir d'importants volumes de ressources, soit de 250 à 600 Mtep respectivement (Berndes, 2003). Tandis que certains pays d'Afrique (République du Congo, Mozambique, etc.) disposent de conditions favorables pour la mise en culture pluviale de surfaces sous-valorisées. Enfin, des pays de la CEI comme la Russie, l'Ukraine et la Biélorussie présentent un fort potentiel de ressources non valorisées, ainsi que d'amélioration des productivités qui permettrait de dégager de larges surfaces de cultures particulièrement adaptées à l'implantation de cultures énergétiques dédiées.

Dans les zones comme l'Union européenne et l'Amérique du Nord, si la disponibilité théorique en ressources bois et résidus agricoles est importante, leur mobilisation reste soumise à certaines contraintes à lever pour un développement plus large de l'offre à court terme. D'une manière générale, les ressources de type sous-produits sont souvent géographiquement dispersées, voire dans le cas des ressources forestières, difficiles d'accès compte tenu de contraintes topographiques (zones de pentes) ou d'infrastructures faisant défaut (chemins, routes, pistes, dépôts, matériels d'exploitation, etc.). Selon le Cemagref, la réfraction due aux seules contraintes naturelles d'accès à la ressource en France diminue le potentiel de bois énergie de 11 %, soit un potentiel moyen terme d'environ huit millions de tonnes

Quelles ressources en biomasse pour un système énergétique durable ?

Tableau 3

Potentiels de biomasses lignocellulosiques mobilisables pour l'énergie et part de la consommation de carburants substituables

	Biomasse totale mobilisable pour l'énergie (Gt MS)	Potentiel moyen terme sous-produits* (Gt MS)	Potentiel moyen terme cultures dédiées** (Gt MS)	% de la demande carburants 2030 (selon les zones)
Monde	13	2,3 – 2,8	1,4 – 1,70	19 à 23
dont Europe et Amérique du Nord		0,3 – 0,6	0,5 – 0,75	10 à 15
dont reste du monde		2,0 – 2,2	0,9 – 0,95	3 à 100

*Sous-produits issus des activités agricoles et forestières. **Selon scénarios d'implantation sur terres mobilisables

Source : divers

de matière sèche (Mt MS). Dans le cas des pailles de céréales, la valorisation énergétique n'est envisagée que sur les stocks non valorisés par les activités d'élevage ou en zones de plaines céréalières. En France, le gisement passe ainsi de 22 Mt MS de pailles produites à 4 Mt MS mobilisables par an pour l'énergie.

Une autre particularité du secteur bois en France et dans d'autres pays européens, est l'importance de la part de surfaces forestières en régime de propriété privée, impliquant une mise en gestion des ressources forestières non systématique et dépendant du consentement à offrir des propriétaires. Il en est de même pour l'engagement des agriculteurs et exploitants forestiers dans l'implantation de cultures pérennes impliquant la mobilisation de parcelles pour un usage exclusivement énergétique pendant plus de dix ans. En France, ce type de cultures s'étend aujourd'hui sur quelques milliers d'hectares, pour la plupart à titre expérimental. Malgré la difficulté à chiffrer l'impact de cette contrainte sur la disponibilité des ressources, elle doit néanmoins être évaluée afin d'envisager une éventuelle mise en place de mesures incitatives.

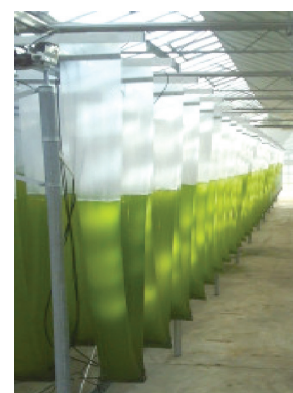
Une certaine pression foncière peut également s'exercer si la demande en cultures énergétiques vient à s'accroître fortement. Cependant, la moindre exigence des cultures pérennes vis-à-vis de la qualité du sol permet dans un premier temps la valorisation de terres dites marginales, gels, friches ou autres terres interdisant la production de cultures alimentaires.

Le développement de cultures de micro-algues pour la production d'huile ou de biomasse, ou encore de cellulose ou d'hydrogène, permettrait *a priori* de s'affranchir de la plupart de ces contraintes, par le biais de culture en photobioréacteur ne nécessitant pas d'implantation sur terre agricole ni forestière (figure 4). Malgré des productivités potentiellement plus élevées que les espèces terrestres, la mise en place de telles productions industrielles nécessiterait des espaces dédiés de plusieurs centaines d'hectares, à proximité de sources de lumière, de chaleur, d'eau et/ou de CO₂.

Fig. 4 - Exemples de réacteurs de cultures ouvert et fermé pour la culture de micro-algues



© Seambiotic



© RWE

Ces filières restent actuellement très exploratoires, impliquant des technologies aujourd'hui adaptées à la valorisation de produits à haute valeur ajoutée, et non directement transposables d'un point de vue des bilans énergétiques et de la rentabilité économique pour la production d'énergie.

Il convient enfin de préciser que, si l'on peut attendre une contribution sérieuse de la biomasse parmi les ressources alternatives pour la production d'énergie (tableau 3), son caractère durable du point de vue du respect de l'environnement est conditionné par un certain nombre de règles à prendre en compte quant à sa production et sa valorisation.

Des ressources respectueuses de l'environnement : une forte dépendance aux pratiques

En tant que filières visant notamment à contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) tout en respectant les ressources naturelles, il convient de s'assurer que leur mise en place n'induit pas d'impacts néfastes sur le climat et l'environnement d'une manière générale. La remise en cause des bienfaits

Quelles ressources en biomasse pour un système énergétique durable ?

environnementaux des filières biocarburants de première génération a impliqué, au niveau européen, la mise en place de conditions d'éligibilité des filières bio-énergies en fonction de leur bilan GES et autres impacts environnementaux, sociaux et économiques. L'article 17 de la Directive 2009/28/CE du Parlement et du Conseil européens, énonce les critères de durabilité appliqués aux biocarburants et bioliquides, avec notamment l'établissement de seuils minimum de réduction des émissions de GES vis-à-vis des filières fossiles, ainsi qu'une liste de types de sols sur lesquels la biomasse ne peut être produite (terres à grande valeur en termes de diversité biologique, à stock de carbone important, tourbière, etc.). Ces critères doivent encore être précisés, notamment concernant les moyens de tracer l'origine des ressources locales et celles des produits importés. D'une manière globale, on peut d'ores et déjà mentionner quelques précautions à envisager pour minimiser les impacts.

Concernant les sous-produits d'exploitation agricole comme forestière, les impacts alloués aux sous-produits ou déchets récupérés s'avèrent limités puisque essentiellement induits par le produit principal valorisé (grain pour les pailles, bois d'œuvre et d'industrie pour les rémanents). Néanmoins, les pailles et rémanents forestiers jouent également un rôle important dans le maintien du contenu en matière organique des sols, notamment dans certaines régions où les terres sont appauvries par des systèmes d'exploitation trop intensifs. Le niveau de mobilisation de ce type de ressources doit donc être mesuré en fonction des conditions et exigences du milieu.

Les cultures conventionnelles dédiées aux biocarburants de première génération sont cultivées selon les mêmes pratiques que pour un usage alimentaire. Si la meilleure productivité est également recherchée, l'apparence et la comestibilité n'est plus une contrainte sur le produit de récolte, permettant l'économie éventuelle de traitements phytosanitaires. L'importance des impacts environnementaux engendrés par ce type de cultures, comme par tout type de culture dédiée, se mesure principalement en fonction de la nature du sol sur lequel elles sont implantées et du niveau d'impact engendré par l'activité qu'elles remplacent. Ainsi, l'implantation d'une culture exigeante en intrant sur un sol initialement occupé par une forêt en croissance ou une prairie assurant

un couvert végétal toute l'année, impliquera un bilan GES nécessairement négatif.

Les cultures dédiées lignocellulosiques pérennes sont par nature plus sobres que les cultures annuelles qui, en rotation, nécessitent plusieurs interventions dans l'année (préparation du sol, semis, désherbage, fertilisation, épandage de produits phytosanitaires, récolte, etc.). Une culture de type miscanthus, switchgrass ou TCR, sur une durée de vie d'environ 20 ans, ne nécessitera que quelques interventions à l'implantation puis en années une et deux. Il faut cependant noter qu'elles développent d'importants systèmes racinaires, limitant potentiellement les fuites de nitrates vers les nappes phréatiques et les rivières, mais susceptibles de prélever d'importantes quantités d'eau. Certaines cultures pourraient être à proscrire dans des zones subissant des périodes de déficit hydrique récurrentes.

Enfin, si la culture de micro-algues ne requiert pas la mobilisation de surfaces agricoles ni forestières, il reste à préciser les besoins en eau de telles productions et la pression exercée sur les ressources locales. Si les risques de pollution directe vers les compartiments eau, air et sol semblent, *a priori*, plus faibles que pour la biomasse terrestre, la dissémination des espèces et d'éventuels contaminants reste un enjeu potentiel, notamment vis-à-vis de l'atteinte à la biodiversité.

La biomasse comme ressource pour la production d'énergie se positionne ainsi comme un candidat sérieux, au potentiel significatif, dont les conditions de développement doivent être maîtrisées de façon à tirer le plus grand bénéfice de son caractère durable.

Les efforts fournis en ce sens sont mesurables à travers les nombreux projets de R&D actuellement en cours visant le développement de nouvelles voies technologiques, la mise en place de méthodologies d'évaluation multicritères d'impacts environnementaux, sociaux, économiques ; ainsi qu'à travers les directives et mesures incitatives (Directive EnR, Paquet Énergie-Climat, objectifs du Grenelle de l'Environnement, Grand Emprunt, Pôles de compétitivité, etc.), qui permettent d'envisager l'essor de plusieurs de ces filières à des horizons compatibles avec les objectifs fixés.

Daphné Lorne - daphne.lorne@ifp.fr
Manuscrit remis en novembre 2009