

Les biocarburants : une option énergétique durable, mais à certaines conditions

On compte fortement sur les biocarburants pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux auxquels nous sommes confrontés. Ceux-ci font également l'objet de nombreux débats autour de l'impact du déploiement potentiel à grande échelle de cette option, qu'il s'agisse d'impacts environnementaux ou d'impacts sur les stratégies agricoles et alimentaires. Les analyses du cycle de vie des biocarburants permettent d'évaluer ces différents impacts, pour chacune des filières ; elles montrent qu'au-delà des performances intrinsèques des procédés de conversion de la biomasse, les intrants (nécessaires aux cultures produisant des biocarburants) et le changement d'affectation des sols lors de la mise en place de ces cultures sont susceptibles de modifier radicalement le bilan des biocarburants en termes d'émissions de gaz à effet de serre.

Par Léonard BONIFACE* et François MOISAN**

Pour nombre d'experts, les biocarburants pourraient apporter une contribution significative à l'approvisionnement en carburants liquides à l'horizon 2030-2050, mais sans être toutefois à même de satisfaire l'ensemble des besoins en énergie liés aux transports. La recherche portant sur de nouvelles filières de biocarburants (de seconde ou de troisième génération) est une étape essentielle pour consolider cette option au niveau mondial, car elle peut permettre de réduire la compétition pour l'affectation des sols, et donc de préserver l'agriculture à finalité alimentaire.

Il est toujours intéressant d'analyser l'évolution de l'utilisation des carburants à partir de l'origine des systèmes qui sont destinés à les utiliser. Ainsi, contrairement à ce que l'on pourrait penser, la plupart des technologies de moteurs qui équipent aujourd'hui nos véhicules n'ont pas été développés, initialement, pour être alimentés spécifiquement par des dérivés du pétrole : avant la découverte des grands gisements, le pétrole n'était pas encore à proprement parler une matière première stratégique. Ainsi, le moteur diesel a été développé par Rudolph Diesel à partir de 1891 pour fonctionner aux huiles végétales ou à l'« huile lourde ». De la même façon, le premier moteur à combustion interne, fabriqué en 1876 par Nikolaus-August Otto, était initialement destiné à consommer de l'éthanol.

Les biocarburants ne sont donc pas une ressource récente, bien que leurs essor réel ne soit intervenu qu'à partir de la

crise pétrolière de 1973, date à partir de laquelle la prise de conscience de notre dépendance énergétique vis-à-vis de pays tiers producteurs de pétrole a permis d'envisager des solutions alternatives de production d'énergie (notamment pour les transports) et la nécessité d'engager des actions visant à limiter les consommations énergétiques en renforçant l'efficacité de nos systèmes de conversion d'énergie et celle de nos organisations.

Ce n'est qu'à partir des années 2000, face aux effets cumulés de la dépendance énergétique, du prix croissant du pétrole et de la prise de conscience progressive des risques liés au réchauffement climatique causé par les émissions de gaz à effet de serre, que la production de biocarburants a progressé de façon significative et continue pour représenter, en 2010, au niveau mondial, plus de 100 milliards de litres, soit environ 3 % de l'énergie consommée par le secteur des transports.

Transports et dépendance énergétique

Au niveau mondial, les transports sont le deuxième secteur émetteur de gaz à effet de serre, après la production d'énergie. En France, le secteur des transports est le premier contributeur aux émissions de gaz à effet de serre (pour plus d'un quart du total), cela, notamment, en raison du fort développement des transports individuels et du faible contenu en carbone de l'électricité produite en France (essentiellement d'origine nucléaire).

Si les émissions de gaz à effet de serre tendent à diminuer dans la plupart des secteurs industriels, elles continuent néanmoins de progresser dans le secteur du bâtiment et, surtout, dans celui des transports.

Dans l'Union européenne, par exemple, entre 1990 et 2004, les émissions de CO₂ liées aux transports ont augmenté de plus de 25 % [1], malgré la réduction unitaire de la consommation des moteurs, la diésélisation du parc automobile et le développement de solutions de mobilité alternatives.

Les transports ont, de surcroît, une particularité notable : ils sont le secteur le plus dépendant vis-à-vis d'une seule ressource énergétique, le pétrole (à hauteur de 98 % à l'échelle mondiale, et de 96 % en Europe).

Une des conséquences de la faible diversité des vecteurs énergétiques pour les transports est le nombre restreint de solutions de conversion de ces vecteurs : moteur diesel ou moteur à essence, pour les transports terrestres, réacteurs fonctionnant au kérosène, pour l'aviation.

En effet, si les rendements de conversion énergétique de ces solutions sont modestes, le stockage d'énergie sous forme chimique, que permet l'état liquide de ces carburants dans les conditions ambiantes, est une propriété qui n'a jamais été égalée par d'autres vecteurs énergétiques avec une densité qui permette une telle autonomie pour les véhicules et un temps de recharge aussi rapide.

La solution de diversification la plus évidente, dans un premier temps, revient donc à des hydrocarbures liquides ayant des propriétés proches des dérivés pétroliers et ne requérant pas d'évolution majeure des systèmes de motorisation : les biocarburants liquides sont donc *a priori* des candidats idéals.

En 2008, les productions mondiales d'éthanol et de biodiesel représentaient respectivement environ 3,7 % et 1,5 % en pouvoir calorifique inférieur (PCI) des consommations mondiales d'essence et de diesel [2].

Quelques éléments prospectifs

Afin de dresser le paysage énergétique à moyen terme, l'Agence internationale de l'énergie a établi en 2008 des scénarios d'évolution du système énergétique mondial à l'horizon 2050, les ETP (*Energy Technology Perspectives*). Actualisés en 2010, ces scénarios examinent notamment les différentes solutions technologiques de production, de conversion, de distribution et d'utilisation finale de l'énergie susceptibles d'y contribuer, et la façon dont ces solutions pourraient permettre de répondre aux défis environnementaux ainsi qu'à ceux liés à la disponibilité des ressources.

Dans le scénario dit tendanciel, qui sert de référence, l'état du système est présenté en l'absence de changements importants dans la politique énergétique actuelle. La demande énergétique mondiale et l'utilisation de carburants fossiles dans les transports doublent l'un et l'autre, d'ici à 2050. Tiré par la croissance et l'évolution des modes de vie dans les pays émergents, le nombre de véhicules individuels fait plus que doubler à l'échelle mondiale.

Dans ce scénario, la biomasse représente environ 1 900 Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole), soit 9 % de la demande primaire d'énergie. La part des biocarburants reste limitée à 4 % de la consommation d'énergie pour les transports, soit 160 Mtep

Les biocarburants en bref

Les biocarburants sont des vecteurs énergétiques fabriqués à partir de biomasse, qui est une ressource renouvelable. Cela revient, d'une certaine façon, à utiliser indirectement de l'énergie solaire, les systèmes chlorophylliens des plantes étant des systèmes de captage et de transformation de cette énergie en énergie chimique.

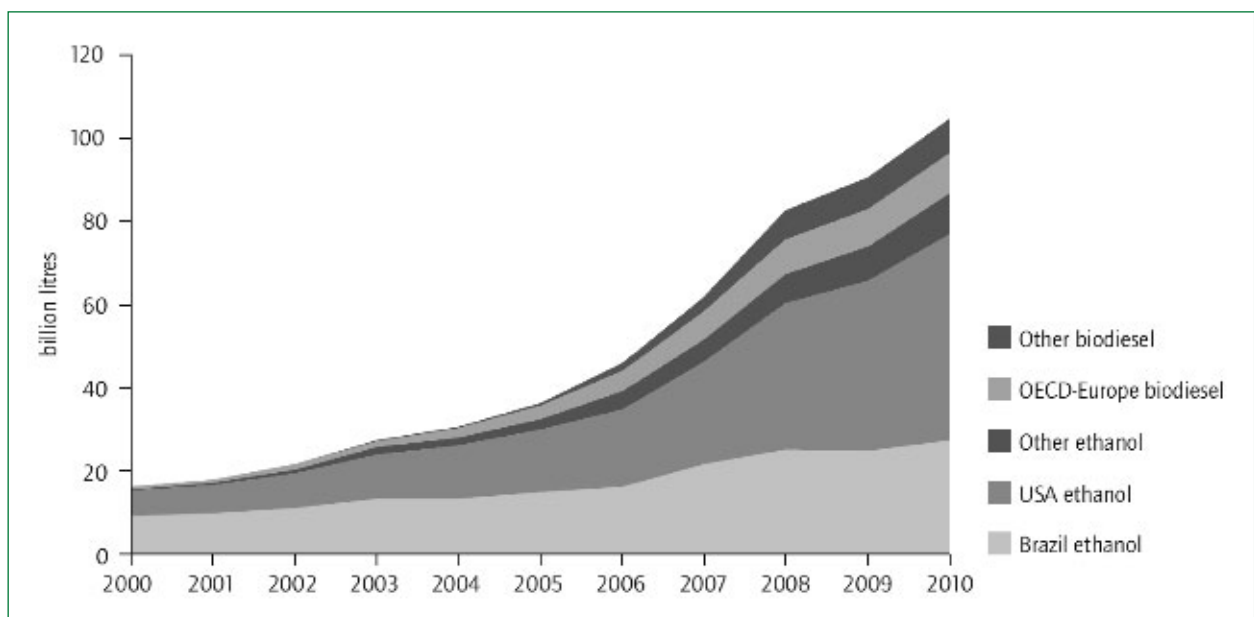


Figure 1 : Evolution de la production mondiale de biocarburants de 2000 à 2010 [3]

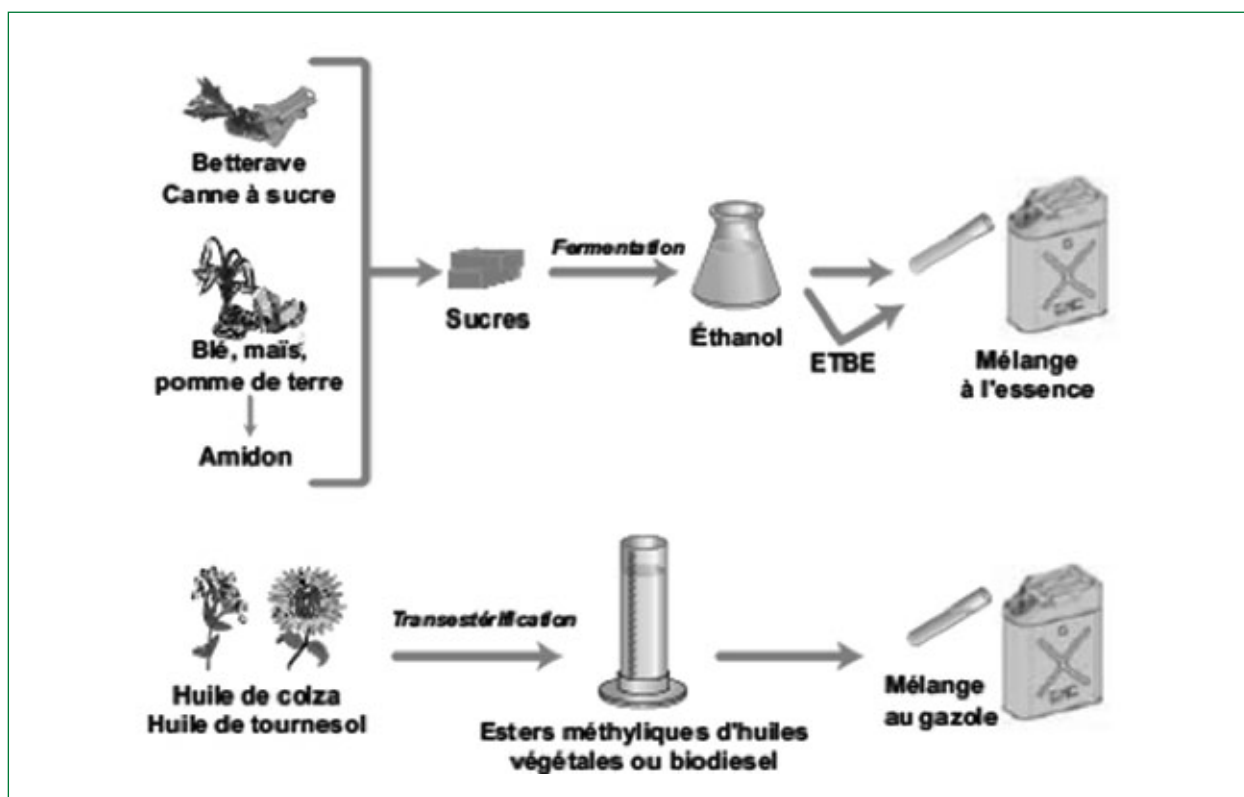


Figure 2 : Biocarburants de première génération [4]

Deux principaux types de biocarburants sont actuellement produits : l'éthanol, pour les moteurs à essence, et le biodiesel, destiné aux moteurs diesel.

L'éthanol est un alcool produit actuellement *via* la fermentation de sucres issus de plantes sucrières (canne à sucre, betterave à sucre) ou amylacées (céréales telles que le maïs ou le blé). Le biodiesel est surtout produit en Europe (où le parc automobile diesel est très développé) à partir d'huiles végétales extraites de graines de colza ou de tournesol et, ailleurs dans le monde, à partir d'huile de palme ou de soja.

Les biocarburants sont utilisés principalement sous forme d'additifs aux carburants traditionnels, dans des proportions généralement inférieures à 10 %. Pour certaines flottes captives (bus, véhicules spéciaux), ils sont utilisés à des teneurs supérieures à 30 %. Dans le cas particulier du Brésil, l'utilisation de super-éthanol (un carburant automobile contenant 85 % d'éthanol) est aujourd'hui banalisée. L'éthanol peut être incorporé à l'essence directement ou sous sa forme estérifiée, l'ETBE (éthyl-tertio-butyl-éther). L'ETBE est un additif pour carburants produit par réaction avec de l'iso-butène issu de ressources pétrolières.

Les bilans environnementaux des biocarburants

Présentée dans un premier temps comme une solution durable, la production de biocarburants a, en augmentant récemment de cadence, soulevé le risque d'un développement incontrôlé. À côté des questions économiques (ten-

sions sur les marchés agricoles), éthiques (problème de la bonne utilisation des ressources agricoles), les biocarburants sont accusés de ne pas présenter les bilans avantageux qu'on leur avait prêtés initialement en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de diminution des ressources fossiles consommées. En effet, toute production, quelle qu'elle soit, a des impacts : produire des biocarburants nécessite en effet de consommer des ressources fossiles, que ce soit directement (*via* les machines agricoles et la transformation de la matière agricole en carburant), ou indirectement, en quantité non négligeable, pour la production des engrais et des autres intrants agricoles.

La comparaison entre les impacts des carburants fossiles et ceux des biocarburants sur la totalité de leur cycle de vie (de la production ou l'extraction des matières premières jusqu'à la combustion du carburant) permet de déterminer le niveau de réduction (ou d'augmentation) des émissions de gaz à effet de serre des uns par rapport aux autres. Un tel travail est complexe et les hypothèses de calcul retenues peuvent influencer de façon importante le résultat.

Avant de s'engager dans l'analyse de cycle de vie (ACV) des carburants, il est primordial de bien identifier les contours de l'étude et de s'accorder sur ses aspects méthodologiques.

Pour la majorité des biocarburants évalués, l'analyse de cycle de vie fait apparaître un gain en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de consommation d'énergie non

renouvelable, par rapport à leur référence fossile. En effet, sans prendre en considération les changements d'affectation des sols, les divers biocarburants affichent des bilans positifs par rapport aux carburants fossiles, avec des réductions du niveau d'émission de GES allant de 24 à 91 %.

Pour les carburants fossiles, les émissions de GES ont lieu très majoritairement lors de la combustion, qui émet du CO₂ d'origine fossile ; ce n'est pas le cas pour les biocarburants, qui émettent, quant à eux, du CO₂ d'origine biogénique (en effet, celui-ci a été capté par les plantes dans l'atmosphère, et son influence sur le bilan carbone global est neutre). Pour les biocarburants végétaux, c'est l'étape de production de la matière première agricole qui est prépondérante, à travers la fabrication des engrais et les émissions de protoxyde d'azote par les sols. L'étape industrielle est importante, voire prépondérante, pour l'éthanol de betterave et pour les esters issus de déchets. Cette étape n'apparaît pas dans le cas de la filière canne à sucre, car les industriels utilisent la bagasse, coproduit de la culture de la canne, comme combustible renouvelable. Enfin, on peut noter que l'étape de fabrication de l'ETBE à partir d'éthanol, qui consomme des énergies fossiles, représente une part significative du bilan de ces biocarburants.

La filière éthanol

En ce qui concerne les filières bioéthanol, les réductions de GES observées sont plus importantes pour les biocarburants issus de plantes sucrières que pour ceux issus de

céréales, les rendements élevés à l'hectare des premières expliquant cet écart.

Toutefois, la modification de l'éthanol en ETBE réduit ces gains, car elle ajoute une étape de production supplémentaire.

La filière biodiesel

Pour la filière biodiesel, les réductions observées comparativement au carburant de référence sont significatives (elles varient de 60 à 90 %), cela, pour l'ensemble des voies. Les biocarburants à base de déchets (huiles alimentaires usagées, graisses animales) offrent les bilans les plus intéressants. Cela tient principalement au fait que le statut de déchet de la matière première utilisée conduit à ne pas prendre en compte d'impacts environnementaux avant l'étape de collecte (collecte d'huiles alimentaires auprès de leurs utilisateurs et collecte de graisses animales après leur extraction d'autres sous-produits).

Les limites de l'analyse

Comme cela a été mentionné précédemment, les résultats d'une analyse de cycle de vie dépendent beaucoup des choix méthodologiques adoptés et des limites propres aux modélisations des paramètres étudiés. Dans le cadre de l'évaluation des ACV de carburants, il est recommandé que la précision de chaque paramètre étudié fasse l'objet d'analyses de sensibilité ; parmi ces paramètres, la prise en

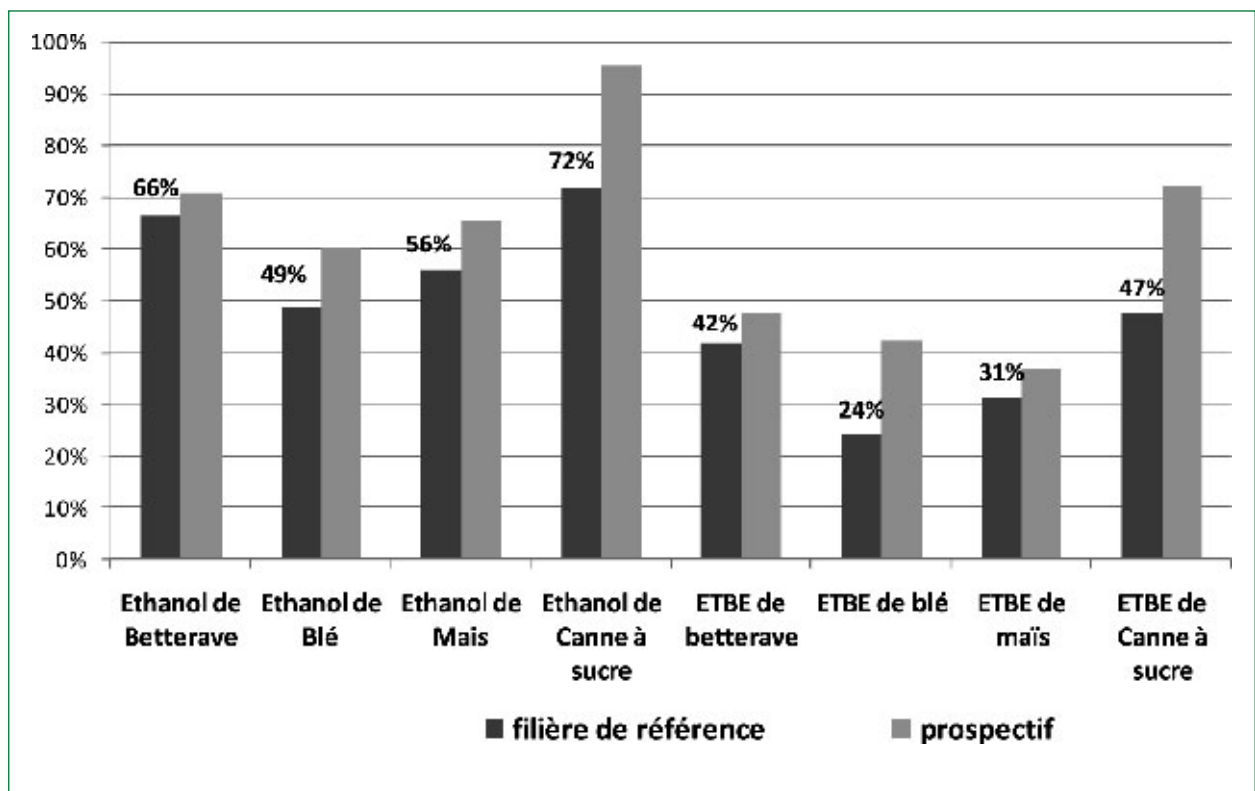


Figure 3 : Réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les filières éthanol (en % de réduction par rapport à la référence fossile), sans prise en compte des changements d'affectation des sols [5]

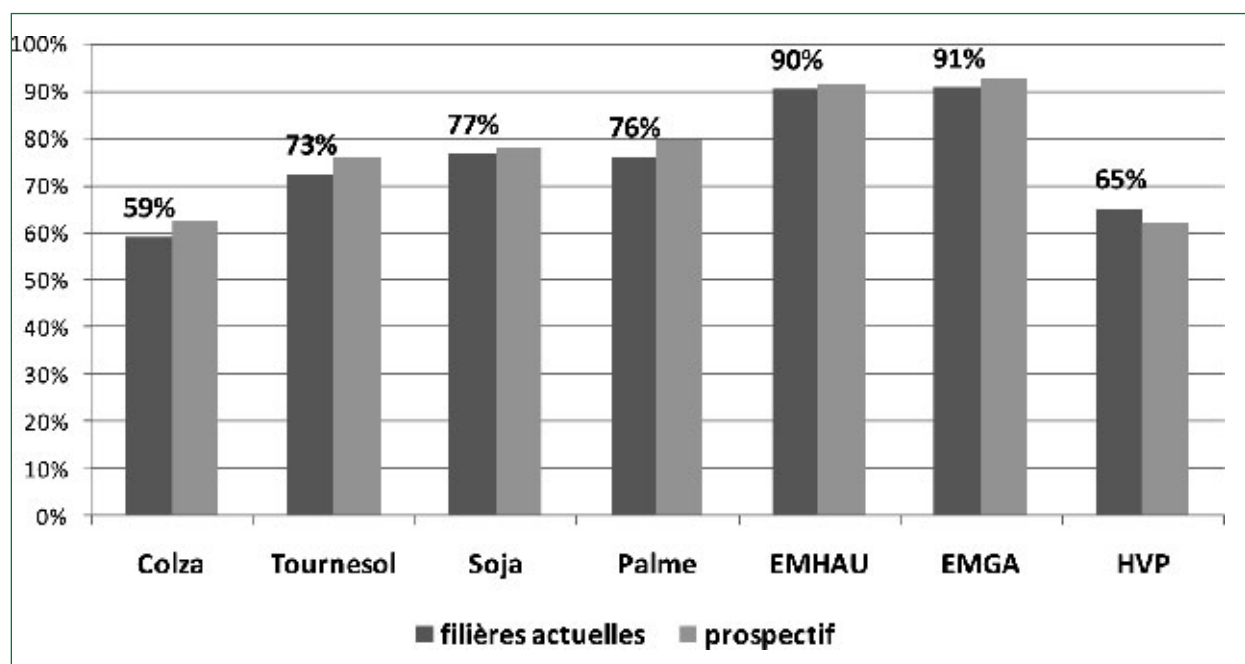


Figure 4 : Réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les filières esters (en % de réduction par rapport à la référence fossile), sans changement d'affectation des sols [5]

compte du changement d'affectation des sols et les émissions de protoxyde d'azote par ces derniers font actuellement l'objet de travaux visant à en préciser les contours, encore insuffisamment définis, alors que leur influence sur les bilans est potentiellement importante.

La prise en compte du changement d'affectation des sols

Les sols ont différents usages et, lorsque leur usage initial est modifié, une pression sur d'autres sols peut en découler. Dans certains cas, on peut parler de changements d'affectation des sols, ces changements étant de deux types :

- ✓ le changement direct : conversion d'une surface non cultivée vers une culture destinée à la production de biocarburants (par exemple, conversion d'une forêt en vue de la culture de plantes produisant du biocarburant) ;
- ✓ le changement indirect : une culture énergétique est mise en place sur des terres dédiées auparavant à des cultures alimentaires, celles-ci devant être effectuées sur d'autres surfaces.

L'état des connaissances sur le changement d'affectation des sols est insuffisant pour pouvoir en évaluer précisément les impacts. De nombreux travaux sont en cours sur ce sujet, mais ils n'ont pas encore abouti, à ce stade, à des références méthodologiques précises. Des analyses de sensibilité s'appuyant sur des méthodologies simplifiées peuvent néanmoins être réalisées ; elles montrent qu'en cas de changement d'affectation des sols, les conséquences sur les bilans ACV sont potentiellement importantes.

La modélisation des émissions de protoxyde d'azote et des apports en engrais

Le protoxyde d'azote (N_2O) est un gaz dont le pouvoir de réchauffement global est près de 300 fois supérieur à celui du CO_2 .

Ce gaz est produit principalement par le fonctionnement biologique des sols agricoles, selon l'importance des apports en engrais azotés et des conditions pédoclimatiques. Ce paramètre représente une des contributions les plus importantes à l'estimation des émissions de gaz à effet de serre de la phase agricole des filières biocarburants.

Plusieurs référentiels de facteurs d'émissions existent, mais aucun ne fait consensus, le plus utilisé étant celui que propose le GIEC. Des travaux de recherche et d'analyse sur le terrain sont nécessaires afin de modéliser ces émissions d'une manière plus précise.

Quel potentiel de ressources les biocarburants représentent-ils ?

Sur une surface terrestre émergée de 14 900 millions d'hectares :

- ✓ 6 200 millions d'hectares ne sont pas couverts de végétation ;
- ✓ 1 500 millions d'hectares sont des terres arables ;
- ✓ 4 100 millions d'hectares sont occupés par les forêts, avec une exploitation moyenne atteignant seulement $1 m^3/ha/an$;
- ✓ 3 100 millions d'hectares sont des prairies et des pâturages permanents [6].

Les sols peuvent également être répartis entre « sols productifs » (3 300 millions d'hectares, soit 22 %) et « sols non productifs » (11 600 millions d'hectares, soit 78 %).

Un des principaux verrous est constitué par la compétition entre l'usage alimentaire et l'usage non alimentaire face à une demande grandissante concernant l'ensemble des matières premières, liée au développement économique et à la démographie.

La mobilisation de sources de biomasse diversifiées est actuellement à l'étude, afin de réduire les concurrences d'usage et d'occupation des sols et des espaces aquatiques :

- ✓ ressources agricoles, y compris les cultures dédiées ;
- ✓ ressources forestières et leurs sous-produits ;
- ✓ micro-algues, macro-algues,
- ✓ déchets organiques (huiles, graisses, déchets ménagers, déchets agricoles et déchets des industries agroalimentaires, boues de stations d'épuration, bois adjuvantés).

En France, la biomasse disponible de manière additionnelle pour les usages énergétiques et la chimie est évaluée entre 15,7 et 20 Mtep/an (millions de tonnes équivalent pétrole par an) ; elle se décompose de la façon suivante :

OFFRE	(Mtep/an)	
Produits forestiers	6,2	10,2
Forêt	4	8
Vignes, vergers, alignements urbains	2	2
Produits connexes industrie du bois	0,15	0,15
Bois en fin de vie	0,1	0,1
Résidus agricoles dont paille	4,3	4,3
Déchets organiques et farines animales	5,2	5,5
Déchets grassex	0,3	0,6
Déchets biomasse des ménages	1,7	1,7
Déchets agricoles	2,5	2,5
Déchets organiques IAA	0,2	0,2
Boues de traitement urbains/industriels	0,45	0,45
Farines animales	0,05	0,05
Total	15,7	20

Figure 5 : Bilan de l'offre de biomasse en France [7]

La politique européenne de développement des biocarburants

En 2003, l'Union européenne s'était fixé à l'horizon 2010 un objectif indicatif d'incorporation de biocarburant de

5,75 % (en contenu énergétique). La France a décliné cet objectif de façon plus ambitieuse en visant 7 % d'incorporation, au même horizon temporel.

Plus récemment, l'Union européenne, dans le cadre de la directive 2009/28/CE, ambitionne de porter à une moyenne de 20 % la part des énergies renouvelables dans sa consommation finale d'énergie à l'horizon 2020 (contre une moyenne de 7 % en 2005). Pour les transports, cet objectif se décline en 10 % de consommation d'énergies renouvelables en 2020. Si l'atteinte des objectifs de consommation peut également s'appuyer sur d'autres ressources que la biomasse (comme, par exemple, l'énergie électrique renouvelable), nul doute que l'effort principal pèsera sur la ressource biomasse, cette dernière étant également fortement sollicitée pour d'autres usages (alimentation, chaleur, électricité...).

Consciente des limites d'un développement incontrôlé des biocarburants, l'Union européenne a défini des critères de durabilité pour les biocarburants consommés en Europe.

Deux conditions importantes encadrent l'objectif européen. La production de biocarburants doit respecter des critères de durabilité dont les principaux sont les suivants :

- ✓ Les biocarburants consommés doivent justifier d'une réduction d'au moins 35 % des émissions de GES en 2010, puis de 50 % en 2017 ;
- ✓ Il ne doit pas y avoir de production de biocarburants sur des terres de grande valeur en termes de biodiversité (forêts primaires, zones protégées, zones de protection d'espèces, prairies à forte biodiversité), ni sur des terres présentant un important stock de carbone ou des tourbières ;
- ✓ Les biocarburants produits en Europe doivent être issus de productions agricoles respectant les règles d'éco-conditionnalité de la politique agricole commune (PAC) ;
- ✓ Les biocarburants importés doivent provenir de pays ayant ratifié et mis en œuvre certaines conventions internationales relatives au travail et à l'environnement en relation avec les critères de la directive 2009/28/CE ;
- ✓ Les producteurs doivent pouvoir justifier qu'ils ont pris des mesures visant à la protection des sols, de l'eau, de l'air, et permettant la restauration des terres dégradées ;

En 2020, la production des biocarburants de deuxième génération doit être opérationnelle sur les plans industriel et commercial.

Les biocarburants avancés

Aujourd'hui, la totalité des biocarburants consommés est produite par des procédés dits de première génération qui ne valorisent que l'organe de réserve de la plante (grains de blé ou de maïs, graines de soja, etc.). Si leurs bilans énergétiques et environnementaux sont positifs par rapport à ceux des carburants fossiles, leurs bilans d'émission de gaz à effet de serre sont très sensibles aux effets du changement d'affectation des sols.

Les procédés de première génération présentent un certain nombre d'inconvénients : ils limitent le champ des res-

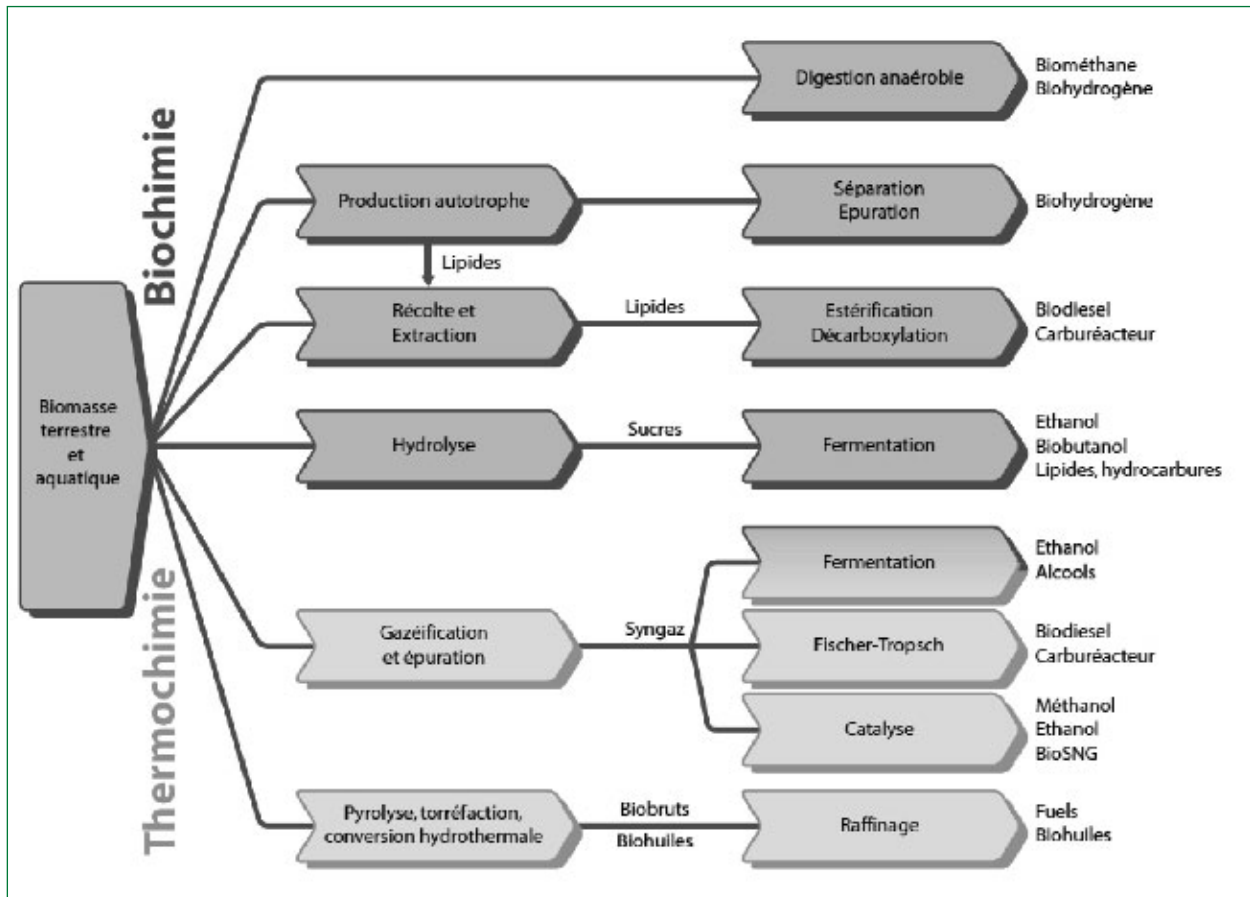


Figure 6 : Procédés de production de biocarburants à partir de différentes biomasses [7]

sources mobilisables pour la production de biocarburants et ils peuvent interférer avec des filières à vocation alimentaire. En revanche, ces filières génèrent des coproduits protéinés qui sont valorisables pour l'alimentation animale. Depuis plusieurs dizaines d'années maintenant, des travaux de recherche et développement sont engagés pour amorcer une transition progressive et cohérente vers d'autres procédés et d'autres vecteurs énergétiques permettant :

- ✓ d'augmenter les rendements de production surfaciques ;
- ✓ de valoriser l'intégralité de la plante et/ou de mobiliser d'autres sources de biomasse ;
- ✓ d'assurer une meilleure complémentarité entre les différents usages de la biomasse, en particulier vis-à-vis du secteur alimentaire,
- ✓ de réduire les pressions sur l'environnement.

Cette nouvelle génération de carburants requiert des technologies de transformation sophistiquées permettant de convertir une large gamme de ressources : agricoles (et leurs sous-produits, comme les pailles de céréales), forestières (y compris les résidus de bois), ainsi que les cultures dédiées, les déchets organiques, etc.

A plus long terme, des biocarburants pourraient aussi être produits à partir de micro-algues ou de micro-organismes, directement à partir d'énergie solaire et de CO₂.

Les carburants avancés peuvent se substituer aux carburants existants ou les compléter avec des exigences nouvelles. L'objectif de la plupart des recherches en cours est d'accéder à des molécules aux bilans énergétique, massique, environnemental et aux rendements surfaciques améliorés. Dans le domaine des biocarburants avancés, les verrous technologiques se situent principalement au niveau des procédés de conversion de la biomasse en biocarburants, ces procédés étant variés et nombreux. Chaque filière possède ainsi ses propres verrous technologiques. Les recherches en cours font appel à la fois à des technologies conventionnelles, à des technologies de rupture et à leur intégration.

La figure 6 regroupe l'ensemble des procédés de conversion envisagés, que ce soit par les voies biochimiques ou thermochimiques. Certains de ces procédés passent par la production de grands intermédiaires comme le gaz de synthèse (syngaz), les bio-bruts (par analogie avec un brut pétrolier, car ils peuvent être raffinés comme des coupes pétrolières), les sucres ou encore les lipides. Certaines voies biochimiques conduisent directement à des biocarburants gazeux, tel le bio-méthane carburant (une technologie mature) ou le bio-hydrogène, qui est, quant à lui, encore au stade de la recherche amont.

Ces classifications ne doivent surtout pas nous faire oublier que les innovations apparaissent souvent à la croisée des

chemins et que les différentes voies peuvent être combinées entre elles, donnant lieu à des procédés hybrides.

Par ailleurs, les biocarburants tendent à s'inscrire toujours davantage dans le concept de *bioraffinage*, dont l'optique est la covalorisation de ressources végétales pour différents usages : alimentation, chimie, matériaux et énergie. Ce concept peut être illustré comme une transposition à la biomasse du principe du raffinage pétrolier, visant à tirer le meilleur parti du carbone végétal en maximisant son usage, en en limitant les déchets et en améliorant la rentabilité de l'ensemble. La bio-raffinerie est un concept dynamique qui n'a pas de modèle industriel préconçu et unique, mais dont beaucoup existent d'ores et déjà (papeteries, amidonneries...). Elle permet une large palette de possibilités selon la biomasse traitée, les marchés visés et le degré d'intégration des différents procédés de transformation.

Afin d'accélérer le développement de la production de biocarburants avancés, l'Ademe a consacré des moyens importants visant à la réalisation de démonstrateurs et d'expérimentations préindustrielles dans différentes filières innovantes. Deux premiers démonstrateurs ont été engagés en 2009 dans le cadre du fonds démonstrateur de recherche, l'un visant la production de biodiesel à partir de biomasse ligno-cellulosique (Bio-T-fuel), l'autre pour la production de biocarburant gazeux par méthanation de la biomasse. Plus récemment, dans le cadre des Investissements d'Avenir, l'Ademe a lancé deux appels à manifestation d'intérêt, l'un pour des expérimentations de

production de biocarburants avancés et l'autre pour des expérimentations de chimie du végétal.

L'enjeu de ces expérimentations est bien de démontrer la faisabilité de ces nouvelles filières au regard d'objectifs énergétiques et environnementaux de moyen et de long terme.

Notes

* Chef de projet Investissement d'Avenir, ADEME.

** Directeur Scientifique, ADEME.

Bibliographie

[1] FISCHER (G.), HIZSNYIK (E.), PRIELER (S.), SHAH (M.) & VAN VELTHUIZEN (H.), Vienne : IIASA/OFID, 228 pages, 2009.

[2] Prometheus Institute – Biofuels 2010 : Spotting the Next Wave – Executive Summary, GTM Research, décembre 2009.

[3] *Medium Term Oil and Gas Markets*, OECD/IEA, Paris, 2010.

[4] Institut Français du Pétrole (IFP).

[5] Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France, ADEME/FranceAgrimer – BIO Intelligence Service – Février 2010.

[6] ROBERT & CHEVERRY, *Le sol, une contrainte pour la sécurité alimentaire mondiale*, Editions QUAE, 2009.

[7] Feuille de route biocarburants avancés, Ademe, 2011.