

Enjeux environnementaux du développement des biocarburants liquides pour le transport

L'évaluation de l'impact environnemental des biocarburants a été et est encore un sujet très controversé. À partir d'une synthèse bibliographique, cet article nous présente les éléments connus et les principales incertitudes concernant les enjeux environnementaux représentés par chaque génération de biocarburants.



En France, l'énergie consommée dans les transports routiers était issue à 97 % du pétrole en 2005, 93 % en 2007, et les émissions associées de gaz à effet de serre (GES) représentaient 32 % des émissions nationales en 2009. Ainsi, face à la tension croissante sur les ressources en pétrole et les enjeux du changement climatique, ce secteur apparaît à la fois particulièrement vulnérable et incontournable à la réussite d'objectifs tels que la réduction des émissions de GES d'un facteur 4 dans les pays développés d'ici à 2050. Le défi principal à résoudre pour le secteur des transports aujourd'hui est donc de pouvoir concilier les besoins de mobilité d'une part, et la nécessité de réduire ses émissions associées de GES et de diversifier son approvisionnement énergétique d'autre part. Parmi les différents niveaux d'actions possibles, de l'accessibilité des services à l'amélioration des motorisations en passant par la modification des habitudes de conduite, le présent article se focalise plus particulièrement sur la production des carburants.

De fait, la production de biocarburants¹ liquides pour le transport a rapidement été identifiée comme un moyen d'action à court terme, au potentiel intéressant, et ce pour plusieurs raisons :

- la biomasse est l'unique source renouvelable permettant, via la photosynthèse, de fournir des vecteurs énergétiques matérialisés, bien adaptés à une utilisation décentralisée en véhicules autonomes ;
- l'usage de biocarburants en moteurs, essence ou diesel, est connu et validé depuis l'invention même de ces moteurs, ce qui autorise leur utilisation dans les moteurs actuels directement ou au prix de modifications mineures ;

- la production de biomasse, intégrée au cycle naturel du carbone, promet des impacts potentiellement réduits en termes d'émissions de GES en comparaison aux sources fossiles (encadré ❶), et permet d'améliorer la sécurité énergétique des pays via l'utilisation de ressources locales ou, *a minima*, via une diversification géographique des dépendances ;
- la conversion de produits agricoles, par des technologies issues et maîtrisées par les industries agro-alimentaires, permet une production immédiate de certains biocarburants, et peut alors constituer un débouché alternatif intéressant pour les agricultures occidentales inquiètes du devenir des politiques publiques de soutien.

Ces enjeux ont ainsi conduit au développement, à la reprise ou l'accentuation, selon les pays, de programmes de soutien aux filières de production de biocarburants (figure ❶), depuis grossièrement le début des années 2000. Afin de confirmer et quantifier l'intérêt des biocarburants produits ou futurs, notamment vis-à-vis de la diminution des émissions de GES et de la réduction de la dépendance énergétique, ces actions se sont accompagnées de travaux d'évaluation environnementale par analyse de cycle de vie (ACV), c'est-à-dire par comparaison des consommations et émissions ayant lieu au cours de l'ensemble des cycles de vie des produits (figure ❷). Cet article vise à clarifier les controverses qui s'en sont suivies et à présenter une synthèse des enjeux environnementaux des biocarburants.

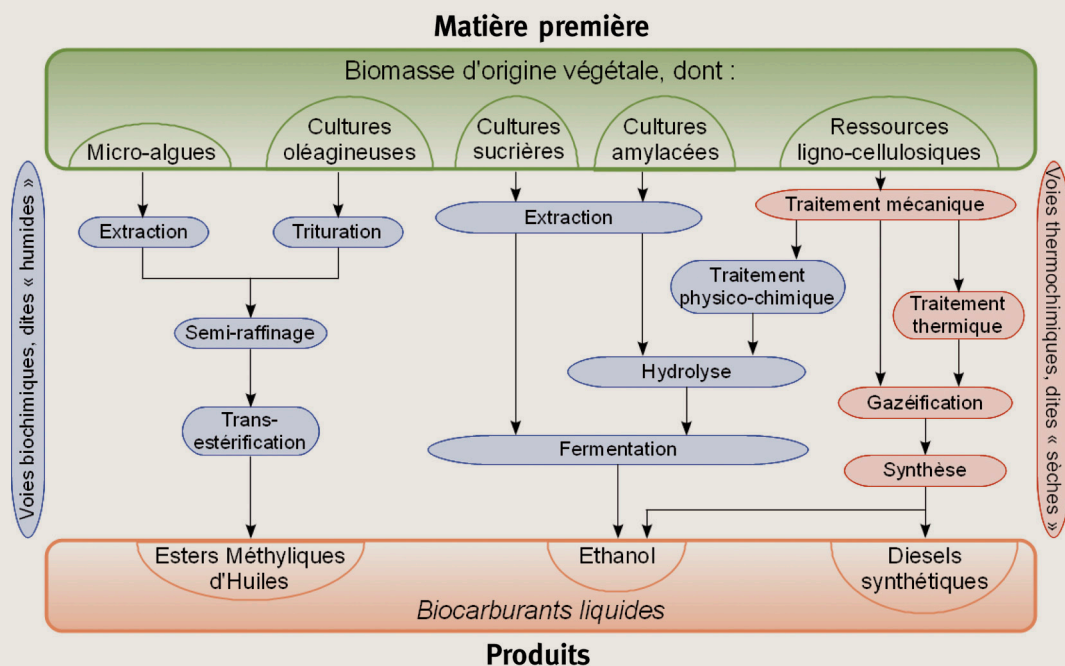
Biocarburants liquides de première génération

Filières et formulation

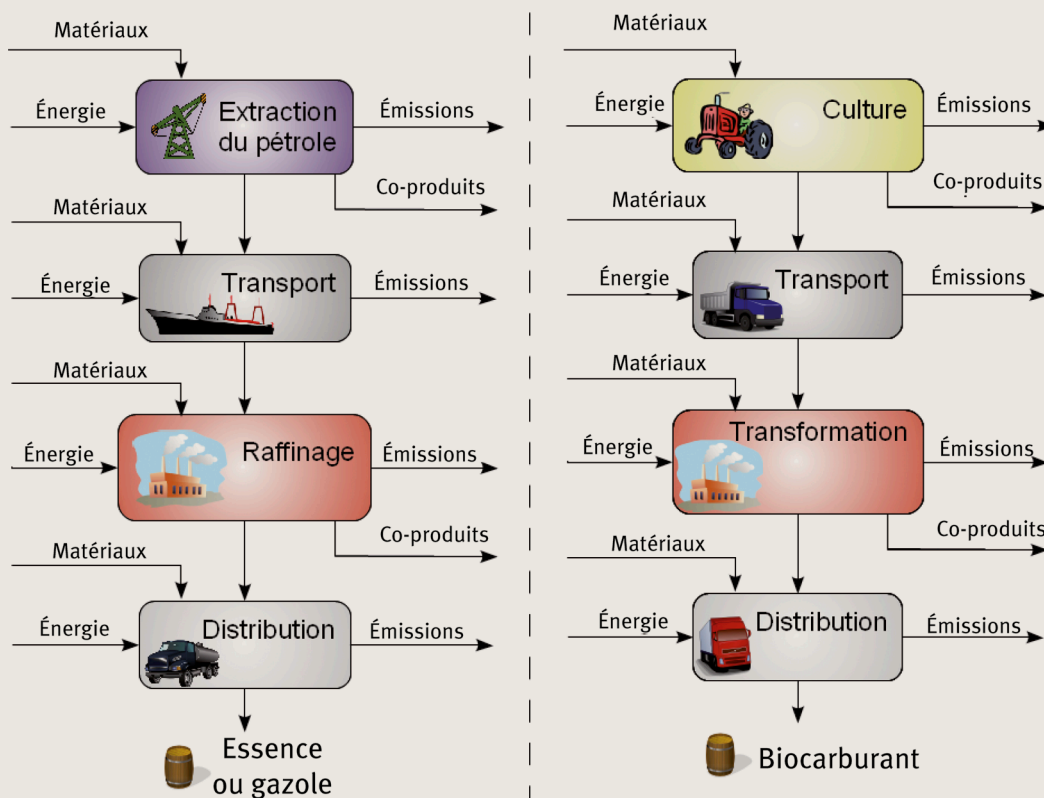
Les biocarburants dits de première génération valorisent les composants alimentaires des végétaux (figure ❶). De ce fait, les technologies de production sont immédiatement accessibles car issues de l'expérience des

1. Le terme « biocarburant » s'entend comme « carburant issu de la biomasse », ce qui englobe l'ensemble des ressources végétales. Il est ici préféré au terme « agro-carburant », utilisé pour désigner les biocarburants spécifiquement issus de l'agriculture.

1 Principales filières de production de biocarburants.



2 Cycles de vie des carburants pétroliers et biocarburants.



industries agro-alimentaires. Les biocarburants sont distingués en fonction des carburants fossiles auxquels ils se substituent :

- la voie éthanol, produit à partir du sucre ou de l'amidon des plantes sucrières ou amylacées (betterave, canne à sucre, céréales, etc.), permet de substituer les essences ;
- la voie des huiles végétales, c'est-à-dire les produits issus des cultures oléagineuses (colza, palmier à huile, tournesol, etc.), permet la substitution des fiouls et des gazoles.

Éthanol et huile végétale peuvent tous deux servir de base, par réaction avec des produits pétroliers, à la production d'additifs de carburants. L'éthyl-tertio-butyl-ether (ETBE) est issu de l'éthérisation de l'éthanol (45 % en masse des réactifs) par l'isobutène (55 % en masse). Les esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV) sont eux issus de la trans-estérification des triglycérides contenus dans l'huile par un alcool, majoritairement le méthanol aujourd'hui à l'échelle industrielle ; les proportions peuvent varier selon les huiles mais il peut être

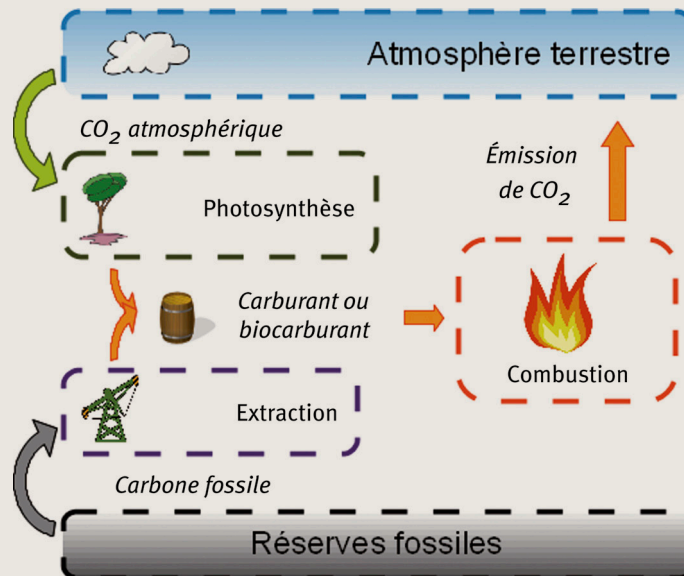
1 BIOCARBURANTS ET PRINCIPE DE NEUTRALITÉ CARBONE

Comme l'indique la figure ③, tous les carburants carbonés, dont font partie l'essence, le gazole et les biocarburants, émettent du CO_2 lors de leur combustion. Toutefois, alors que l'utilisation de carburants pétroliers constitue un déstockage de carbone qui a été fossilisé selon un processus qui a pris des millions d'années, celle des biocarburants s'intègre dans un cycle du carbone, beaucoup plus court, dont le phénomène clé est la photosynthèse. C'est le principe de la *neutralité carbone* des biocarburants : l'émission de CO_2 associée à leur combustion ainsi que l'absorption photosynthétique de CO_2 par les végétaux ne sont pas comptabilisées, puisqu'ils se compensent exactement.

Deux précautions importantes doivent toutefois être prises quant à l'application de ce principe :

- la neutralité carbone concerne uniquement l'émission de CO_2 associée à la combustion des biocarburants, et ne doit pas être généralisée à l'ensemble des émissions ayant lieu lors de la production de ces biocarburants. Tout l'intérêt des approches par ACV est justement de prendre en compte ces émissions ;
- dans certains cas, tels que lors de déforestations par exemple, le cycle du carbone n'est pas respecté et la neutralité carbone ne s'applique plus. Ces cas sont intimement liés aux changements d'affectation des sols, et les émissions occasionnées sont alors prises en compte lors de la description de ces phénomènes.

③ Carburants et flux de carbone.



- ▶ considéré que 1 kg d'huile et 0,1 kg de méthanol permettent la production de 1 kg d'EMHV, accompagnée de celle de 0,1 kg de glycérine. L'intérêt essentiel de cette trans-estérification est d'obtenir un produit possédant des caractéristiques bien plus proches de celles d'un gazole, notamment du point de vue de la viscosité ou de l'indice de cétane, et donc mieux adapté à une utilisation comme carburant pour les transports.

Les principales formes commerciales des biocarburants liquides de première génération sont l'éthanol et les EMHV. En Europe, par exemple, en 2009, en termes d'énergie consommée, 79 % des biocarburants utilisés étaient des EMHV, 19 % de l'éthanol, et les 2 % restants des huiles végétales pures (HVP), dont la consommation n'est significative qu'en Autriche, Allemagne et Irlande. Dans cet article, les enjeux environnementaux suivants relatifs à la 1^{re} génération se concentrent sur l'éthanol et les EMHV.

Bilans énergie et gaz à effet de serre

Panorama général

La consommation énergétique et les émissions de GES sont les enjeux environnementaux des biocarburants qui ont été les plus intensément étudiés ; en 2011, la moitié des ACV publiées dans des journaux scientifiques internationaux et relatifs à la biomasse-énergie se focalisait sur ces deux aspects, voire un seul des deux. Cela s'explique notamment par le fait que ces deux enjeux étaient au cœur de la justification des programmes de soutien public aux biocarburants. Or, très rapidement, les études réalisées ont montré d'importantes disparités dans leurs résultats, ce qui a été à l'origine d'importantes controverses. Parmi les nombreux éléments à l'origine

de ces différences très significatives de résultats, deux grands types de causes peuvent être retenus :

- la méthodologie même de l'ACV, notamment dans ses règles de calculs ou les frontières des systèmes étudiés ;
- la spécificité locale et la variabilité naturelle des systèmes agricoles, tant dans leurs performances (rendements, itinéraires techniques) que dans leur comportement vis-à-vis de l'environnement (émissions de protoxyde d'azote par les sols).

Résoudre les difficultés du premier point nécessite une homogénéisation des méthodes utilisées, par des travaux portant à la fois sur les concepts de l'ACV et les spécificités des systèmes de biocarburants. Ceci est abordé à l'heure actuelle par de nombreux groupes de travail, tant nationaux (Ademe et Afnor) qu'internationaux (Commission européenne, Comité européen de normalisation, ISO, *Roundtable on Sustainable Biofuels*, etc.). Le second point est inhérent aux productions végétales. La réduction des incertitudes associées ne peut être réalisée que par un travail important de recherche pour la compréhension des mécanismes mis en œuvre et de collecte de données très localisées.

Toutefois, malgré les disparités constatées, la grande majorité des études concordent sur un effet bénéfique, bien que variable, des biocarburants sur les bilans énergétiques et GES du transport en comparaison aux produits fossiles, hors changement d'affectation des sols :

- concernant l'éthanol, les bilans énergétiques sont généralement déterminés par les procédés de transformation de la matière première agricole en carburant ; les bilans les moins favorables sont alors ceux des plantes amylicées (céréales, tubercules), et les plus intéressants



1 Parcelles de cannes à sucre sur l'île de La Réunion.

ceux des plantes sucrières (betterave, et surtout canne à sucre). Cette hiérarchisation se retrouve pour les bilans GES, avec toutefois une répartition plus équilibrée entre les rôles des phases de culture et de transformation, du fait notamment du rôle important de la fertilisation pour les émissions de GES ;

- pour les EMHV, la phase agricole est cette fois-ci l'élément le plus déterminant puisqu'elle est généralement la phase prédominante des bilans GES et compte pour grossièrement la moitié des bilans énergétiques. Du point de vue de la comparaison de ces bilans, par mégajoule produit, à ceux des filières fossiles, l'effet bénéfique des EMHV tend globalement à être plus important que celui des filières d'éthanol.

Cultures tempérées et cultures tropicales

Dans le panorama des ressources possibles pour la production de biocarburants liquides, la canne à sucre (photo 1), pour l'éthanol, et le palmier à huile, pour l'EMHV, se démarquent nettement par des bilans plus favorables, et ce malgré l'importation nécessaire pour un usage en Europe par exemple. Ceci s'explique principalement par trois raisons, communes pour ces deux filières :

- ces deux ressources sont issues de cultures tropicales, autorisant la valorisation d'une plus grande quantité d'énergie solaire incidente ;
- ces cultures sont pérennes, ce qui présente plusieurs avantages agronomiques et environnementaux ;
- l'approvisionnement en énergie des procédés de transformation est assuré par un résidu de culture : la bagasse dans le cas de la canne à sucre, et les régimes de fruits vides pour le palmier.

Concernant les biocarburants d'origine tempérée, chaque filière génère également un coproduit de transformation qui représente des quantités importantes : pulpes et vinasses pour la betterave, drêches pour les céréales, et tourteaux pour les oléagineux. La différence avec les filières tropicales est que ces coproduits ont une valeur alimentaire, et qu'aujourd'hui, le contexte économique est tel qu'il est plus rentable de les valoriser comme aliments du bétail que de les utiliser pour assurer l'approvisionnement énergétique des installations, via leur méthanisation ou leur combustion.

Cependant, dans une situation où les prix de l'énergie augmenteraient fortement et où les marchés alimentaires resteraient relativement stables, il pourrait devenir économiquement plus intéressant d'utiliser énergétiquement ces coproduits. Les calculs montrent qu'alors, les bilans énergétiques et GES des biocarburants d'origine tempérée deviendraient grossièrement équivalents à ceux issus de la canne à sucre et du palmier.

Quel objectif au développement de filières de biocarburants ?

Vis-à-vis de la comparaison de filières de biocarburants, deux grands types de questions peuvent être posés :

- « quelles productions de biocarburants présentent les meilleures performances environnementales pour une utilisation dans les transports ? », ou
- « quelle est la mobilisation des sols la plus efficace en termes d'atténuation du changement climatique et de réduction de la dépendance énergétique ? ».

La majorité des études réalisées aujourd'hui, ainsi que les tendances exprimées plus haut, répondent au premier type de questions. Le point de vue adopté est alors celui

du secteur des transports et les carburants sont comparés sur la base de leur contenu énergétique en mégajoules (MJ), ou de distances parcourues, en kilomètres. Dans le second type de question, le point de vue adopté est celui de l'aménagement du territoire, et les filières sont comparées sur la base de l'hectare mobilisé. Entre ces deux questions, deux paramètres interviennent alors de façon importante : le rendement en biocarburant final des différentes cultures, et la capacité des filières à produire, via la valorisation des coproduits, des aliments du bétail permettant de libérer des surfaces par ailleurs.

Malheureusement, les performances des filières se hiérarchisent différemment selon le point de vue adopté. En Europe, pour une affectation par impacts évités² et exprimés par MJ produit, les résultats d'ACV montrent des bilans à peu près équivalents pour l'éthanol de blé et de betterave, et des bilans plus faibles et donc plus intéressants pour l'EMHV de colza (photo 2). Dans les mêmes conditions mais exprimé par hectare mobilisé, l'éthanol de blé et l'EMHV de colza sont grossièrement équivalents, et l'éthanol de betterave se démarque nettement par des économies liées à la substitution de carburant fossile bien supérieures (de l'ordre de 7 à 9 tCO_{2-éq} économisées par hectare et par an, contre environ de 2 à 4 tCO_{2-éq} économisées par hectare et par an pour l'éthanol de blé et l'EMHV de colza).

Le même phénomène est constaté pour la problématique de valorisation énergétique des coproduits, où il a été vu plus haut que ce type de valorisation permet une importante amélioration des bilans énergie et GES exprimés par MJ de biocarburant produit. Cette tendance s'inverse lorsque les résultats sont exprimés par hectare mobilisé, et c'est alors la valorisation alimentaire des coproduits qui permet les plus grandes économies de GES par hectare mobilisé (puisque celle-ci permet de « libérer » des surfaces consacrées à l'alimentation du bétail par ailleurs), auxquelles s'ajoute son rôle dans la réduction de la dépendance en protéines pour les rations animales.

Impact des changements d'affectation des sols (CAS)

Enfin, le dernier enjeu clé des biocarburants de première génération, qui concerne en premier lieu leurs bilans GES, est l'existence potentielle de changements d'affectation des sols (CAS). Deux facteurs principaux peuvent générer des CAS :

- la compétition d'usage des sols. Dans ce cas, le besoin de terres pour la production de biocarburants engendre un accroissement de la surface agricole cultivée, qui se fait au détriment d'autres usages non alimentaires (terres en jachère, forêts, etc.) ou d'usages destinés à la production animale (pâturages notamment) dont l'activité doit alors globalement s'intensifier. Ce phénomène est alors généralement appelé CAS direct ;

2. L'affectation par impacts évités est une des deux grandes familles de règles d'affectation des coproduits, c'est-à-dire la façon dont est réparti l'impact d'un procédé à l'origine de plusieurs produits. L'autre grande famille est celle de l'affectation par prorata.



- la modification de l'offre alimentaire. Ce cas apparaît lorsque la production de biocarburants vient substituer une surface à vocation alimentaire : ceci concerne en premier lieu les surfaces cultivées mais peut aussi toucher les usages destinés à la production animale, où la diminution des pâturages va créer un accroissement de la demande en aliments du bétail. Ces modifications de l'offre alimentaire vont alors nécessiter la mise en culture de nouvelles surfaces, provoquant là encore un CAS mais qui peut se situer dans n'importe quelle région du globe capable d'accroître sa surface agricole. Cet effet est désigné sous le nom de CAS indirect.

Ces CAS jouent un rôle important pour les bilans GES des biocarburants puisque l'usage d'un sol conditionne fortement le stock de carbone accessible, tant dans le sol que dans la biomasse aérienne (arbres essentiellement). Malheureusement ces changements d'usage conduisent très généralement, directement ou indirectement, à une diminution du stockage de carbone, notamment lorsque la production de biocarburants est réalisée à base de cultures annuelles. Dans de rares cas toutefois, l'effet d'un CAS peut être positif, s'il conduit par exemple à la restauration de terres dégradées grâce à des cultures pérennes (voir notamment, page suivante, les enjeux de la deuxième génération).

Or, les quantités de carbone impliquées par ces variations de stockage des sols sont d'un ordre de grandeur bien supérieur aux économies de GES réalisées par la substitution de carburants fossiles par des biocarburants. L'ensemble des études réalisées s'accorde pour conclure que si un CAS est identifié et implique un retournement que de prairie ou une déforestation, le bilan GES du biocarburant responsable est alors très nettement négatif et le

3 Les biocarburants de deuxième génération sont issus de ressources dites ligno-cellulosiques, telles que le bois et les résidus agricoles.



temps nécessaire pour que l'économie annuelle due à la substitution compense la diminution de stock de carbone se compte en décennies.

Toutefois, si l'enjeu majeur des CAS est clairement reconnu, toute la difficulté consiste à pouvoir les identifier clairement. En effet, compte tenu de la multitude et de la complexité des phénomènes régissant l'affectation globale des sols (demande alimentaire des populations, rôle des stocks de matières premières et spéculation, etc.), il est extrêmement difficile d'isoler un phénomène particulier, ici le développement des biocarburants, afin de lui attribuer de façon quantitative une responsabilité dans les mouvements existants d'affectation des sols. C'est pourquoi ce point concentre aujourd'hui l'essentiel des incertitudes et constitue certainement la source principale des débats concernant l'intérêt des biocarburants de première génération vis-à-vis du changement climatique.

Autres indicateurs environnementaux

Concernant les enjeux environnementaux autres que l'épuisement des ressources et le changement climatique, les études d'ACV les ayant pris en compte, bien que moins nombreuses, présentent des résultats et des conclusions plus homogènes. D'une façon générale, les grandes problématiques environnementales de l'agriculture se retrouvent pour le cas particulier des biocarburants. Ainsi, le potentiel d'eutrophisation, lié essentiellement à la fertilisation des cultures, est de façon logique bien plus important pour les filières éthanol et EMHV que pour leurs références fossiles.

À l'inverse, la comparaison des impacts associés aux enjeux de toxicité humaine et d'écotoxicité ne permet pas de conclure clairement quant à un désavantage ou un bénéfice environnemental des biocarburants vis-à-vis des carburants fossiles, notamment du fait des incertitudes importantes attachées à ce type d'indicateurs. En effet, si l'emploi de produits phytosanitaires pénalise les filières biocarburants en comparaison avec les filières fossiles, cet effet peut être compensé, partiellement compensé ou aggravé, selon les filières et les usages, et sur l'ensemble du cycle de vie, par la modification des émissions polluantes au pot d'échappement.

Enfin, à travers la problématique des CAS principalement et selon la conduite des cultures dédiées à la production de biocarburants, l'impact sur la biodiversité de ces

filieres par rapport aux références fossiles pourrait être plus fort, notamment dans le cas d'extension des terres agricoles au détriment de surfaces boisées, plus riches. Toutefois les incertitudes sur ce type d'indicateur, encore très mal connu, sont extrêmement élevées.

Biocarburants liquides de deuxième génération

Filières

Les biocarburants de deuxième génération sont issus de ressources dites ligno-cellulosiques (figure 1), telles que le bois et les résidus agricoles (photo 3), c'est-à-dire constituées essentiellement de lignine (15 à 20 %), de cellulose (35 à 50 %) et d'hémicellulose (20 à 30 %). Deux grandes voies technologiques sont susceptibles de valoriser plus ou moins complètement ces polymères :

- la **voie biochimique** désigne la filière de valorisation de la biomasse ligno-cellulosique par hydrolyse puis fermentation. Le produit final principal est l'éthanol dit « cellulosique », en référence à la fraction majoritairement valorisée de la biomasse. Il est exactement de même nature que l'éthanol de première génération ;
- la **voie thermochimique** ou BTL (*Biomass To Liquid*) désigne la filière de valorisation de la biomasse ligno-cellulosique par gazéification puis synthèse. Le produit final peut être du diesel, du DME (diméthyl éther), du méthanol ou encore de l'éthanol. Cette voie doit son nom à la réaction de gazéification qui combine des processus thermiques et chimiques à températures élevées (> 800 °C). Elle produit entre autres l'hydrogène (H₂) et le monoxyde de carbone (CO) qui dans une étape ultérieure du procédé sont valorisés en hydrocarbures liquides (C_xH_yO_z).

Il convient de préciser, que contrairement aux filières de première génération, les biocarburants de deuxième génération ne sont pas encore disponibles sur le marché, et les technologies de conversion dont ils sont issus en sont au stade, soit de la recherche, soit du pilote industriel.

Enjeux environnementaux associés

Les bilans environnementaux des biocarburants de deuxième génération, basés sur des descriptions prospectives de filières, possèdent un degré d'incertitude supérieur à ceux de la première génération. Toutefois, l'ensemble des études réalisées s'accorde globalement, pour les productions tempérées, sur une réduction potentielle des impacts environnementaux associés à la deuxième génération, en comparaison avec la première. En particulier, les performances en termes de consommation d'énergie et d'émissions de GES sont améliorées, et ce pour des raisons très similaires à celles pour lesquelles la canne à sucre et le palmier à huile se distinguent parmi la première génération :

- la biomasse récoltée est valorisée à la fois pour être transformée en carburants et pour fournir l'énergie nécessaire à cette transformation, permettant une autonomie du procédé vis-à-vis des énergies fossiles ;

1 Synthèse des principaux enjeux technico-environnementaux des différentes générations de biocarburants

Types de biocarburants	Filières	Ressources	Principaux atouts	Principales limites
Première génération	Éthanol	Cultures sucrières, céréales	Technologies matures. Bilans énergie et GES globalement inférieurs à ceux de l'essence et du diesel.	Forte emprise au sol, effet majeur des CAS. Impacts locaux liés à la phase agricole, inexistant dans le cas des filières pétrolières.
	Huiles végétales et EMHV	Cultures oléagineuses		
Deuxième génération	Éthanol cellulosique BTL	Éléments non spécifiques aux résidus ou aux cultures	Bilans énergie/GES et impacts locaux plus réduits que pour la première génération.	Technologies en développement (pilotes de démonstration industrielle), encore coûteuses.
		Résidus forestiers ou de culture	Impacts limités de la mobilisation de résidus. Pas d'emprise au sol.	Potentiel limité de la ressource.
		Cultures dédiées (TCR, herbacés)	Emprise au sol réduite par rapport à la première génération.	Possibilité d'effets négatifs liés au CAS.
Troisième génération	Huiles végétales et EMHV	Micro-algues	Emprise au sol réduite par rapport aux première et deuxième générations, avec possibilité de mobiliser des terres non fertiles. Capacité de capture biologique du CO ₂ industriel.	Technologies immatures. Forts besoins énergétiques liés à la production des micro-algues et l'extraction de l'huile.

- les potentiels de production en carburants à l'hectare sont généralement, la betterave mise à part, plus élevés, du fait que la fraction valorisable de la biomasse ne se limite plus aux composants alimentaires mais à l'ensemble de la plante ;
- les types de ressources potentielles étant plus diversifiées, il est possible de retenir des sources de biomasse à l'impact environnemental réduit.

Les filières basées sur la valorisation de résidus

Ce dernier point est un atout important de la deuxième génération. En effet les technologies concernées peuvent permettre de valoriser des matériaux qui sont aujourd'hui des résidus voire des déchets, d'origine agricole ou forestière, et qui possèdent donc un impact environnemental réduit puisque celui-ci se limite à l'effet éventuel de leur prélèvement (modification de la qualité des sols liée au prélèvement de pailles si elles étaient enfouies auparavant par exemple), à la logistique de collecte et à d'éventuels prétraitements avant valorisation. De plus, ce type de ressource ne nécessite pas spécifiquement de surfaces, ainsi sa mobilisation n'induit pas de CAS, écueil essentiel de la première génération.

Toutefois, avec l'intérêt renouvelé pour la biomasse, ces résidus n'attirent pas seulement l'intérêt pour la production de carburants, mais également pour la production d'énergie au sens large (chaleur, électricité), voire de matériaux. Leur potentiel en tant que ressource risque donc d'être relativement limité vis-à-vis des enjeux de

la production de biocarburants pour le transport, et il semble aujourd'hui peu crédible de voir se développer des filières de deuxième génération ne reposant que sur l'exploitation de résidus.

Les filières basées sur l'exploitation de cultures dédiées

Du fait de ces limites quantitatives du potentiel valorisable en carburants des résidus, l'exploitation de cultures dédiées est toujours envisagée, ce qui présente potentiellement les mêmes risques liés à la mobilisation des sols que ceux vus pour la première génération. Cependant, les cultures aujourd'hui identifiées, telles que les taillis forestiers à courte ou très courte rotation (TCR ou TTCR) ou les cultures pérennes herbacées (miscanthus ou panic érigé notamment), conduisent à des impacts environnementaux plus réduits que les cultures de première génération du fait de leur plus grande productivité et des avantages procurés par leur cycle pérenne. Globalement, et toujours en comparaison, leurs performances énergétiques et de réduction des GES sont alors meilleures et leur potentiel d'eutrophisation, s'il reste généralement plus élevé que celui des filières fossiles, est plus faible.

Enfin, les filières de deuxième génération basées sur l'exploitation de cultures dédiées mobilisent des surfaces et jouent donc un rôle dans la problématique des CAS. Toutefois, là encore, à production égale en carburants, l'enjeu est moins fort que pour la première génération puisque les rendements en biocarburants

sont globalement plus élevés, et surtout puisque, selon la conduite des TCR ou espèces pérennes, les stocks de carbone accessibles sous ces cultures peuvent être plus élevés que pour des cultures annuelles. De la même façon, la plus forte présence de ces cultures pérennes dédiées dans le maillage actuel pourrait potentiellement être favorable localement à la biodiversité.

Biocarburants liquides de troisième génération

Depuis quelques années une troisième génération de carburant est envisagée et suscite un vif intérêt : l'utilisation de micro-algues (figure 1). Le principe est de cultiver dans des bassins à ciel ouvert ou dans des photo-bioréacteurs des algues unicellulaires. Elles se multiplient grâce à un apport de nutriments et de dioxyde de carbone dissous dans l'eau de culture (ce qui permet de valoriser des fumées industrielles).

De façon générale, l'exploitation de ces organismes offre de nombreux avantages : les micro-algues présentent une croissance plus rapide que celle des plantes terrestres supérieures (grâce au milieu liquide, les nutriments sont directement assimilables) et sous certaines conditions, la fraction lipidique de cette biomasse est importante, ce qui permet d'envisager des rendements énergétiques très élevés. Enfin, le taux élevé de fixation de CO₂ par unité de surface positionne ces micro-organismes comme une alternative pour la fixation du CO₂ d'origine industrielle.

Récemment, plusieurs travaux se sont intéressés aux impacts environnementaux de ces filières de troisième génération. Il s'agit d'études prospectives construites autour de procédés pilotes, d'extrapolation et de recueils bibliographiques. Bien que de nombreux projets de recherche soient actuellement en cours au niveau mondial, les filières industrielles ne peuvent en effet s'envisager avant plusieurs années. Ces premiers résultats laissent clairement entrevoir un réel intérêt au niveau de l'occupation des terres, avec des rendements à l'hectare très largement supérieurs aux carburants de première génération et l'utilisation de terres non fertiles (sols pauvres, salines en reconversion, etc.). Cependant le point clé de

l'industrialisation de ces filières sera les dépenses énergétiques associées : les consommations énergétiques des étapes de culture et d'extraction, où de grands volumes d'eau sont en jeu, sont en effet les principaux contributeurs aux impacts environnementaux identifiés. Les années à venir vont être déterminantes pour la faisabilité de ces types de carburant.

Conclusion

Le sujet de l'évaluation des biocarburants est particulièrement complexe car il recouvre de nombreux aspects, des défis technologiques des filières de deuxième et troisième génération aux questions éthiques de la valorisation énergétique de composés alimentaires par la première génération. L'objet du présent article a été ici d'en présenter les effets environnementaux uniquement, ce qui ne saurait suffire à une évaluation globale mais en constitue un premier pas important. En guise de synthèse finale, le tableau 1 regroupe les principaux enjeux de chaque génération de biocarburants. ■

Les auteurs

**Anthony BENOIST,
Laurent VAN DE STEENE
et François BROUST**

CIRAD, UPR 42 Biomasse-énergie,
TA B-42/16, 73 rue Jean-François Breton,
34398 Montpellier Cedex 5

✉ anthony.benoist@cirad.fr

✉ laurent.van_de_steene@cirad.fr

✉ francois.broust@cirad.fr

Arnaud HELIAS

Montpellier SupAgro
34060 Montpellier Cedex 2

INRA, UR50 LBE, 11500 Narbonne

✉ arnaud.helias@supagro.inra.fr

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- ✉ **BENOIST, A.**, 2009, *Éléments d'adaptation de la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie aux carburants végétaux : cas de la première génération*, Thèse, École des Mines ParisTech, Paris.
- ✉ **CHERUBINI, F., STROMMAN, A.H.**, 2011, Life cycle assessment of bioenergy systems : state of the art and future challenges, *Bioresource Technology*, vol. 102, n° 2, p 437-451.
- ✉ **EUROBSERV'ER**, 2011, Baromètre biocarburants, *Systèmes solaires – Le journal des énergies renouvelables*, vol. juillet, n° 204, p 68-93.
- ✉ **ZAH, R., BÖNI, H., GAUCH, M., HISCHIER, R., LEHMANN, M., WÄGER, P.**, 2007, *Life cycle assessment of energy products : Environmental impact assessment of biofuels*, Rapport d'étude, Empa, Bern.