

Vers une génération plus « verte » de biodiesels[☆]

Gilles Vaitilingom^{1,*}, Zéphirin Mouloungui², Anthony Benoist¹, François Broust¹, Tizane Daho³ et Bruno Piriou¹

¹ CIRAD UPR BioWooEB, 34398 Montpellier, France

² INP-ENSIACET UMR 1010, 31432 Toulouse, France

³ Université Joseph KI-ZERBO, LPCE département de physique, 03 BP 7021, Ouagadougou, Burkina Faso

Reçu le 30 janvier 2020 – Accepté le 16 novembre 2020

Résumé – Dans le monde, le pétrole assure 96 % des besoins des transports, lesquels mobilisent 65 % du pétrole consommé et participent à hauteur de 20 % aux émissions de CO₂. Afin de réduire la consommation de ressources fossiles, une des alternatives est notamment l'utilisation de « biocarburants ». Ces biocarburants sont classés en trois générations successives. Les biocarburants de première génération sont issus des parties alimentaires de plantes de grande culture : le bioéthanol et le biodiesel. Les biocarburants dits « avancés » de seconde génération sont issus de ressources lignocellulosiques (bois, résidus agricoles...) valorisées soit en bioéthanol soit en hydrocarbures de synthèse. Une troisième génération repose sur la culture de micro-algues productrices d'acides gras transformés en biodiesel. Les biodiesels de première génération, tout comme ceux de deuxième et troisième générations, sont sujets à certaines critiques notamment le CAS (changement d'affectation des sols) et la compétition alimentaire/énergétique. L'objectif de ce travail est d'examiner l'intérêt de deux filières prometteuses. Les biodiesels basés sur des cultures dédiées conduisent à des impacts environnementaux plus réduits mais jouent un rôle dans la problématique des CAS. Alors que celles basées sur les résidus n'y entrent pas et montrent des niveaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre entre 83 et 90 % contre 60 à 80 % pour un biodiesel classique par rapport à un carburant diesel fossile. Les esters butyliques d'huiles alimentaires usagées et de graisses animales s'affichent comme des biodiesels « plus verts » et représentent une opportunité pour les biocarburants de deuxième génération et pour une oléochimie « plus verte ».

Mots clés : biodiesel / CAS / résidus / déchets

Abstract – Towards a “greener” generation of biodiesels. In the world, oil provides 96% of transport needs, which mobilize 65% of the oil consumed and contribute 20% to CO₂ emissions. One of the alternatives to reduce the consumption of fossil resources is the use of “biofuels”. These biofuels are classified into three successive generations. The first generation biofuels come from the food parts of field crops: bioethanol and biodiesel. Second generation “advanced” biofuels come from lignocellulosic resources (wood, agricultural residues, etc.) valued either as bioethanol or synthetic hydrocarbons. A third generation is based on the culture of micro-algae producing fatty acids transformed into biodiesel. The first generation biodiesels, like those of the second and third generations, are subject to certain criticisms in particular the LUC (Land-Use Change) and the food *versus* energy competition. The objective of this work is to examine the interest of two promising ways. Biodiesel based on dedicated crops lead to reduced environmental impacts but play a role in the problem of LUC. While those based on residues are not part of the problem and show levels of reduction of greenhouse gas emissions between 83 and 90% against 60 to 80% for a conventional biodiesel compared to a fossil diesel fuel. Butyl esters of used edible oils and animal fats are displayed as “greener” biodiesels and represent an opportunity for second generation biofuels and for a greener oleochemistry.

Keywords: biodiesel / LUC / residues / waste

[☆] Contribution to the Topical Issue “Biodiesel / Biodiesel”

*Correspondance : gilles.vaitilingom@cirad.fr

1 Introduction

Le réchauffement climatique lié à une production non maîtrisée de gaz à effet de serre est aujourd'hui une préoccupation majeure au niveau mondial. La nécessité d'une transition écologique fait partie des recommandations des COP (*Conference of Parties*) depuis 2015. Elle vise une modification des modes de production et de consommation, notamment dans le domaine de l'énergie.

En effet, en 2018 (IEA, 2020), 81,3 % des énergies primaires extraites dans le monde provenaient encore des ressources fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel). Trois secteurs principaux utilisent les quelques 10 000 Mtep (418 EJ) consommés annuellement : le résidentiel (33 %), le transport (29 %) et l'industrie (28 %). Le pétrole assure 96 % des besoins des transports, ces derniers mobilisant 65,2 % du pétrole consommé chaque année. Par ailleurs, il reste le vecteur le plus polluant après le charbon¹, avec une participation à l'émission de CO₂ mondial à hauteur de 31,4 % soit 20,5 % pour le seul secteur du transport. Il est donc nécessaire que des solutions alternatives soient trouvées afin de réduire la consommation d'énergie issue de ressources fossiles pour ce secteur. Une des alternatives est notamment l'utilisation de ressources renouvelables dont la biomasse végétale pour la production de « biocarburant ». Ces biocarburants sont classés en trois générations.

Les biocarburants de première génération, ou 1G, sont issus des parties alimentaires de plantes de grande culture (Naik *et al.*, 2010; Pioch et Vaitilingom, 2005) Ils sont de deux types : le bioéthanol (pour les moteurs à essence) provenant de la fermentation de sucre de betterave ou de canne, ou de l'amidon des céréales, et les esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV) qui composent le biodiesel (destiné aux moteurs diesel) produits à partir de différentes sources d'acides gras, notamment les huiles végétales. Seuls ces deux biocarburants sont aujourd'hui produits à l'échelle industrielle grâce à des technologies matures mais leur utilisation reste minime vis-à-vis du pétrole, 3,7 % en 2018 avec un potentiel maximum estimé à 10 % de substitution du pétrole consacré aux transports (IEA, 2020) et leur production représente des perspectives modestes d'améliorations de rendements (Singh *et al.*, 2020 ; Mohanty et Swain, 2019).

Il faut également citer les HVO (*Hydroprocessed Vegetable Oil*) ou HEFA (*Hydroproceed Ester and Fatty Acids*) pour le secteur aéronautique (Kandaramath *et al.*, 2015) qui sont des gazoles obtenus par hydrotraitement d'acides gras et qui peuvent être incorporés sans limite de mélange dans les gazoles ou les jets fuels conventionnels d'origine fossile. Le marché est en cours de développement.

Les biocarburants dits « avancés » de seconde génération, 2G, sont issus de ressources dites lignocellulosiques telles que le bois et ses co-produits, les algues et, de manière plus générale, du vivant (ADEME, 2011). Dans ces procédés, la plante est quasi-intégralement valorisée soit en bioéthanol soit en hydrocarbures de synthèse (Cherubini, 2010). Ces deux filières reposent sur des technologies, respectivement par voie biochimique ou thermochimique, qui sont encore au stade de développement, voire de démonstration, pour optimiser leurs performances et leurs rendements. Mais leur potentiel de substitution aux carburants pétroliers est deux à trois fois

supérieur, jusqu'à 27 %, à celui de la première génération (ADEME, 2011).

Une troisième génération de biocarburants avancés (dits algocarburants) repose sur la culture de micro-algues productrices d'acides gras qui peuvent être extraits et transformés en carburant de type biodiesel (EMHV). Cette voie n'est actuellement pas développée commercialement (Chisti, 2007 ; Enamala *et al.*, 2018).

Les biodiesels de première génération, les seuls utilisés, sont sujets à certaines critiques notamment le CAS (changement d'affectation des sols) et la compétition alimentaire/énergétique. Les biodiesels de deuxième et troisième générations, en développement, sont déjà soumis, dans une moindre mesure, aux mêmes critiques.

De ce fait, il semble que la tendance soit de délaissier les biodiesels alors même qu'il apparaît de nouvelles alternatives pour une génération de biodiesels « plus verts ».

L'objectif de ce travail est d'examiner l'intérêt de deux filières de production de biodiesel qui semblent prometteuses, l'une basée sur l'utilisation de résidus (déchets) et l'autre sur l'exploitation de cultures dédiées, aussi bien sous l'angle de vue technique qu'en termes d'enjeux technico-environnementaux.

2 Revue des biocarburants biodiesels dits « avancés »

Les biodiesels de première génération utilisent des matières premières destinées à l'alimentation animale ou humaine et posent ainsi des questions éthiques (De Lattre-Gasquet *et al.*, 2010). Les filières de biocarburants dits « avancés » se positionnent comme des alternatives possibles à celles de première génération.

Il convient de rappeler, 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. Pour la troisième génération, si des technologies commerciales existent et sont en œuvre, elles ne le sont cependant pas pour produire des quantités massives à des coûts aujourd'hui acceptables vis-à-vis des produits pétroliers. Les biocarburants dits « avancés » présentent des valeurs de 6 à 7 et jusqu'à 9 sur l'échelle TRL² (ETIP Bioenergy, 2020).

2.1 Les biocarburants de seconde génération ou 2G

Les biocarburants 2G sont définis (Singh et Singh, 2010 ; Karmakar *et al.*, 2010) comme étant issus de la biomasse lignocellulosique (BLC) ressource non alimentaire, disponible en grandes quantités et sous différentes formes (bois, résidus forestiers ou agricoles, co-produits d'industries du bois ou agroalimentaires, cultures dédiées, voire certains déchets ligneux). Ces ressources sont constituées essentiellement de lignine (15 à 20 %), de cellulose (35 à 50 %) et d'hémicellulose (20 à 30 %).

² TRL (technology readiness level) : Trl 1-3 : stade recherche ; Trl 4-5 : phase pilote ; Trl 6-7 : démonstration ; Trl 8 : pré-industrielle ; Trl 9 : phase commerciale.

¹ Emission de CO₂ due au charbon en 2018 : 44,0 %

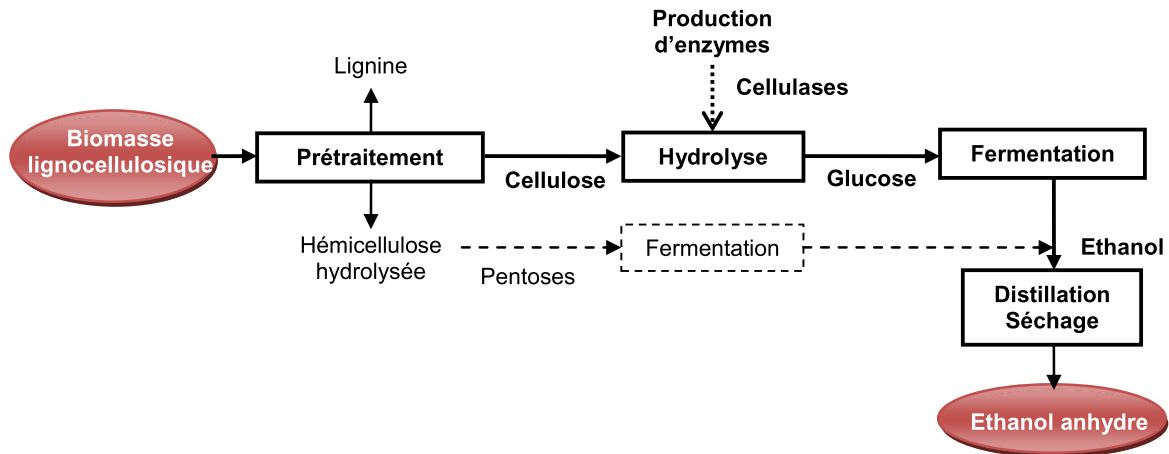


Fig. 1. Schéma de principe du procédé de production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique.

Deux grandes voies technologiques sont susceptibles de valoriser plus ou moins complètement ces polymères.

2.1.1 La voie biochimique

La voie biochimique (Fig. 1) désigne la filière de valorisation par hydrolyse de la lignocellulose, puis fermentation des sucres. Le produit final principal est l'éthanol dit « cellulosique », en référence à la fraction majoritairement valorisée de la biomasse. Il est de même nature que l'éthanol de première génération, substituable à l'essence. Ce n'est donc pas un biodiesel mais son utilisation à des taux variables dans les gazoles tend à se développer (Satgé de Caro *et al.*, 2001 ; Haifeng *et al.*, 2016 ; Wu *et al.*, 2020).

Les principales contraintes de la filière sont liées à (Broust *et al.*, 2013) :

- la composition de la biomasse lignocellulosique, dans le sens où la lignine n'est pas directement valorisable en carburant (source de limitation des rendements) et constitue une barrière physique dans les traitements ;
- la dépendance des procédés vis-à-vis de fournisseurs d'enzymes et leurs coûts ;
- l'efficacité des processus de transformation ;
- l'effet d'échelle pour assurer la rentabilité du procédé et la gestion de l'approvisionnement, car la capacité de production envisagée des projets est supérieure à 100 000 tonnes de carburants par an.

2.1.2 La voie thermochimique: la filière BtL (*Biomass to Liquid*)

La voie thermochimique couvre un vaste ensemble de procédés permettant de décomposer la matrice lignocellulosique en combustibles solides, liquides et gazeux, destinés à des finalités multiples (chaleur, électricité, biocarburants).

Trois types de procédés font l'objet de travaux de R&D plus ou moins avancés pour la production de biocarburants liquides (ADEME, 2011) :

- la pyrolyse rapide (ou flash) produit majoritairement un liquide organique, appelé huile de pyrolyse ou bio-huile ;
- la liquéfaction hydrothermale (ou directe) de biomasse conduit à un produit final, appelé biocrude, plus stable que la bio-huile et convertible en substitut du diesel ;

- la gazéification produit majoritairement un gaz de synthèse, le syngas. La figure 2 illustre la voie la plus répandue qui est la synthèse catalytique Fischer-Tropsch (FT). Elle conduit à des carburants de type gazole ou kérosène, de très bonne qualité.

2.1.3 Principales contraintes techniques de la filière

Les procédés de gazéification de biomasse sont aujourd'hui bien connus et maîtrisés en cogénération ; en revanche, pour des applications biocarburants, la complexité technologique place encore cette voie au stade de la recherche-développement et de la démonstration. La plupart des projets concentrent leurs efforts de recherche sur l'étape d'élimination des goudrons après gazéification de la biomasse et la purification du gaz de synthèse.

La démonstration de la faisabilité industrielle à grande échelle n'est pas encore complètement validée et implique notamment la maîtrise de la chaîne d'approvisionnement et l'optimisation des opérations de préparation de la ressource lignocellulosique (Kargbo *et al.*, 2021).

2.2 Les algocarburants ou biocarburants de troisième génération

Le principe des biocarburants de troisième génération repose sur la production par des algues (micro- ou macroalgues) de produits qui peuvent être extraits et valorisés en biocarburants. Ces biocarburants de troisième génération sont principalement produits par des microalgues.

Les microalgues constituent une nouvelle ressource en biomasse qui permet d'obtenir ce que l'on peut appeler des « algocarburants » sous formes, soit de bioéthanol, soit de biodiesels (Fig. 3), tous deux utilisables comme biocarburants de troisième génération pour la production d'énergie (Razzak *et al.*, 2013). Les sous-produits de la technologie sont également étudiés en vue d'une valorisation permettant d'aboutir à un concept industriel « zéro déchet ».

Les microalgues présentent un potentiel important pour la production d'énergie et en particulier de biocarburants :

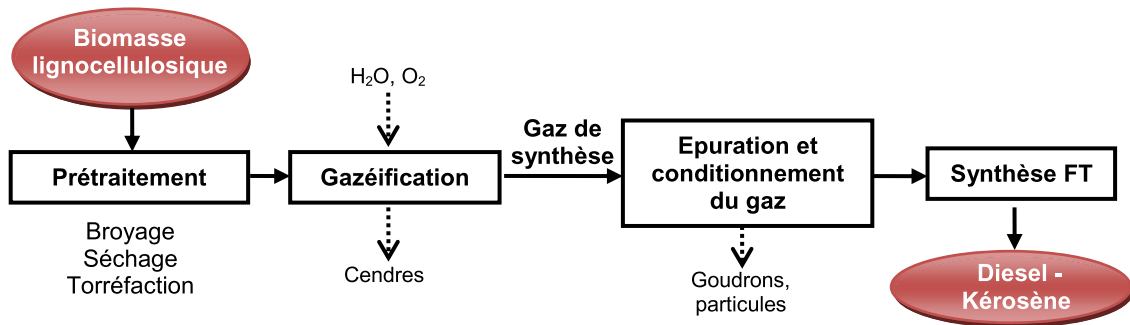


Fig. 2. Schéma de principe de la filière *Biomass to Liquids* (voie thermochimique par gazéification).

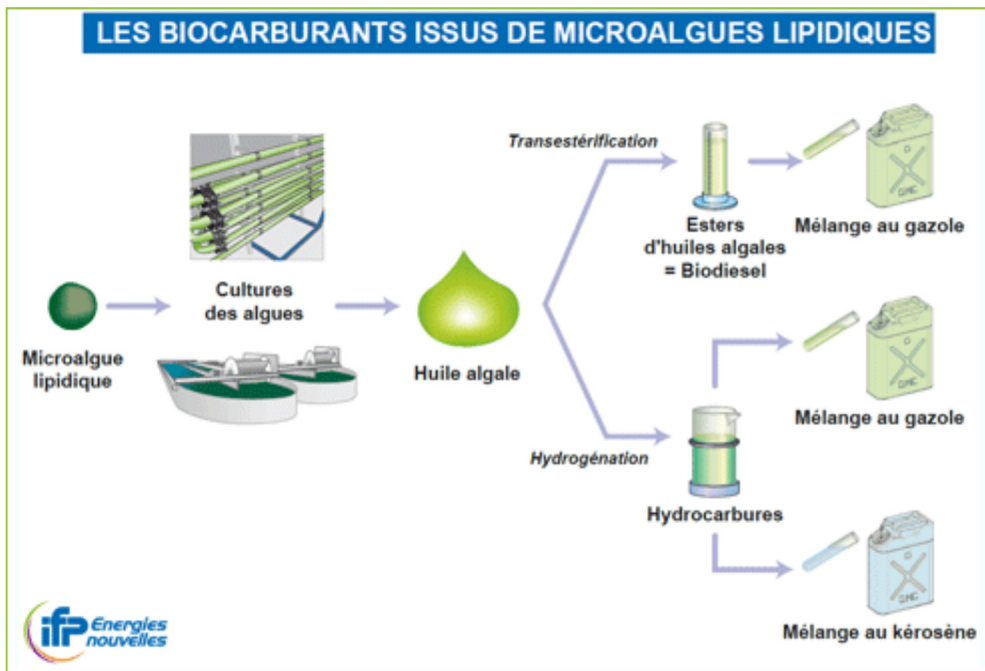


Fig. 3. Schéma des filières de productions de biocarburants issus de microalgues lipidiques.

productivité théorique très élevée, possibilité de culture sur terres non arables, coproduits d'intérêt, croissance sur effluents liquides et gazeux (Mathimani *et al.*, 2019).

La filière lipidique, destinée à l'élaboration de biodiesel, est la plus largement explorée et utilisée depuis 20 ans³.

Les algues sont sélectionnées pour leur production d'acides gras (lipides) à haut contenu énergétique, qui peuvent être convertis en biocarburants de type EMHV (biodiesel), de gaz de synthèse ou de biokérosène incorporable dans les jet fuels.

Ces micro-organismes ont plusieurs avantages :

- grâce à la photosynthèse, qui utilise la lumière solaire comme source d'énergie et le CO₂ comme source de

carbone, les microalgues sont capables de convertir directement du CO₂ qui peut être d'origine fossile, en lipides – autrement dit en huiles –, pouvant eux-mêmes être transformés en molécules utiles à faible empreinte carbone ;

- les microalgues sont cultivables sur des surfaces non agricoles (photo bioréacteurs, lagunes naturelles, bassins artificiels...);
- ces microorganismes peuvent accumuler des acides gras jusqu'à 80 % de leur poids sec permettant d'envisager des rendements à l'hectare supérieurs d'un facteur 50 aux espèces oléagineuses terrestres comme le colza et d'un facteur 10 à l'huile de palme industrielle (ADEME, 2011, p.26–27). Mais ce ne sont que des extrapolations dépendantes des modes de production utilisés ;
- ils ont de nombreuses applications potentielles pas seulement dans les carburants mais aussi et, aujourd'hui surtout, dans la chimie et les compléments alimentaires à haute valeur ajoutée (oméga-3, EPA et DHA, spiruline, qui représenteraient 50 % de la production mondiale, suivie par

³ D'autres espèces de microalgues peuvent contenir des sucres et ainsi être fermentées en bioéthanol et les microalgues peuvent être méthanisées pour produire du biogaz (biométhane). De nouvelles voies sont en cours d'études telle que la production d'hydrogène. Par exemple, en absence de soufre, l'algue *Chlamydomonas reinhardtii* produit de l'hydrogène.

des microalgues vertes *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Nannochloropsis*, *Schizochytrium* et la diatomée *Odontella*).

2.2.1 Principales contraintes techniques de la filière

Les nombreux avantages annoncés par rapport aux autres types de biocarburants sont toutefois contrebalancés par de nombreux verrous technologiques et incertitudes autour des bilans technico-économiques et environnementaux. De façon résumée, il est à noter le choix des espèces en fonction des conditions de production envisagée car il existe des espèces marines ou d'eau douce, certaines adaptées au froid et d'autres au milieu tropical. Les conditions de stress pour induire la synthèse de lipides à vocation énergétique peuvent nécessiter des conditions artificielles de croissance, soit un éclairage constant, soit du froid ou de la chaleur, la consommation d'eau selon la filière peut aussi être une contrainte. Si les connaissances sur la physiologie ont permis de préciser les conditions expérimentales à imposer pour stimuler une synthèse transitoire de lipides, il demeure deux verrous importants : la récolte de microorganismes en milieu aqueux et l'extraction puis la purification des huiles obtenues. L'optimisation de ces procédés afin d'atteindre des coûts acceptables pour un biodiesel, tout en conservant un coût environnemental moindre, n'a pas encore été démontrée (Brennan et Owende, 2010 ; Pandit et Fulekar, 2019 ; IRENA, 2016).

En résumé, à côté des biodiesels de première génération critiqués pour leurs rendements insuffisants, ceux dits « avancés » sont eux confrontés à des verrous techniques et économiques. Le plus abouti techniquement, le biodiesel issu de la filière BtL impose qu'afin de minimiser les pertes thermiques et bénéficier des économies d'échelle, la capacité de production envisagée des projets soit supérieure à 100 000 tonnes de carburants. Compte tenu du rendement matière massique de l'ensemble de la chaîne de procédés, 18 % pour un fonctionnement à 100 % à partir de biomasse lignocellulosique avec une efficacité énergétique comprise entre 35 et 40 %, la mobilisation d'une très grande quantité de biomasse, de l'ordre du million de tonnes par an, est ainsi rendue nécessaire. Les perspectives d'ordre de grandeur des rendements matières attendus à 2050 sont de 30 % pour les voies BtL et éthanol cellulosique. Les efficacités énergétiques respectives atteindraient 55 % (ADEME, 2011).

À cela s'ajoutent les enjeux environnementaux. Comme indiqué en introduction, ceux-ci ont été soulevés par les filières de première génération mais impactent déjà ceux de seconde génération avant même leur diffusion commerciale.

3 Enjeux technico-économiques et environnementaux des trois générations de biodiesels

3.1 Impact des changements d'affectation des sols (CAS)

Un enjeu-clé des biocarburants, qu'ils soient de première génération ou carburants « avancés », et qui affecte leurs bilans GES, est l'existence potentielle de changements d'affectation

des sols (CAS). Deux facteurs principaux (Benoist *et al.*, 2012) peuvent générer des CAS :

- la compétition d'usage des sols. Ici, 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. Il est à noter qu'en général les CAS « directs » sont associés à des projets de bioénergie (par exemple : la culture de miscanthus sur une prairie) et qui n'incluent pas les changements indirects (paragraphe suivant) ;
- la modification de l'offre alimentaire. Ceci 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 (Berndes *et al.*, 2013).

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). 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 et deuxième générations vis-à-vis du changement climatique. Les « débats » se sont poursuivis et ont notamment conduit au plafonnement de la première génération en Europe (Directive EU/2015/1513).

3.2 Enjeux technico-économiques et environnementaux

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 sur une réduction potentielle des impacts environnementaux associés à la deuxième génération, en comparaison avec la première (Commission européenne, 2017). Ceci grâce à :

Tableau 1. Synthèse des principaux enjeux technico-environnementaux des différentes générations de biocarburants (Benoist *et al.*, 2012).

Types de biocarburants	Filières	Ressources	Principaux atouts	Principales limites
1 ^{re} génération	Éthanol	Cultures sucrières, céréales	Technologies matures Consommation d'énergie fossile et GES inférieurs à ceux de l'essence et du diesel	Forte emprise au sol, effet majeur des CAS ¹⁵ Impacts locaux liés à la phase agricole, inexistant dans le cas des filières pétrolières
2 ^e génération	Huiles végétales et EMHV Éthanol cellulosique BtL	Cultures oléagineuses Éléments non spécifiques aux résidus ou aux cultures	Bilans énergie/GES et impacts locaux plus réduits que pour la 1 ^{re} génération	Technologies en développement (pilotes de démonstration industrielle), encore coûteuses Potentiel limité de la ressource
		Résidus forestiers ou de culture Cultures dédiées (TCR, herbacés)	Impacts limités de la mobilisation de résidus Pas d'emprise au sol Emprise au sol réduite par rapport à la 1 ^{re} génération	Risque de CAS toujours existant Impacts locaux liés à la phase agricole, inexistant dans le cas des filières pétrolières
3 ^e génération	Huiles végétales et EMHV	Microalgues	Emprise au sol réduite par rapport aux 1 ^{re} et 2 ^e générations, avec possibilité de mobiliser des terres non fertiles Capacité de capture biologique du CO ₂ industriel	Technologies matures. Forts besoins énergétiques liés à la production des microalgues et l'extraction de l'huile

- une biomasse récoltée 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 ;
- des potentiels de production en carburants à l'hectare généralement 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. Il faut noter que la prise en compte des co-produits améliore également significativement l'empreinte des carburants de première génération.

Les types de ressources potentielles étant plus diversifiées, il devient possible de retenir des sources de biomasse à l'impact environnemental réduit et à la rentabilité la meilleure (Tab. 1).

La troisième génération est porteuse d'atouts significatifs en termes de CAS, sa principale limite est aujourd'hui d'ordre économique.

Toute la biomasse étant potentiellement convertie en carburants, les rendements (GJ/ha) des biocarburants de seconde génération sont bien supérieurs (de deux à quatre fois la productivité par hectare) aux biocarburants de première génération, à l'exception de la canne à sucre ou de l'ester

d'huile de palme, s'ils sont produits dans des conditions pédoclimatiques favorables (Tab. 2).

Vu sous l'angle des surfaces nécessaires à la production d'une tonne équivalent pétrole (tep), il est permis de mieux apprécier le potentiel des cultures utilisées en première et deuxième générations (Tab. 3).

Le biodiesel de palme, culture pérenne et atypique vis-à-vis des oléagineux terrestres du fait de sa productivité élevée, est celui qui demande le moins de surface pour une même production énergétique. Les éthanol de première génération se tiennent dans une fourchette de 0.30 à 0.91 hectare pour une tonne équivalent pétrole, ce qui est très proche de ceux de la seconde génération : 0.25 à 0.83.

L'aboutissement technique et économique de la filière Fischer-Tropsch (FT) appliquée à la biomasse lignocellulosique améliorerait significativement le développement de la seconde génération avec moins de 0,5 hectare par tep produite.

En ce qui concerne l'analyse des effets potentiels du changement d'affectation des sols (CAS) sur les bilans d'émissions de GES des biocarburants consommés en France : « les travaux existants ou en cours n'ont pas encore réussi à créer des références matures d'un point de vue méthodologiques sur ces sujets. À partir de l'étude ACV biocarburants publiée par l'ADEME en 2010, le principe retenu est de calculer les bilans d'émissions de GES sans

Tableau 2. Productivités comparées des biocarburants de première et seconde générations (Broust *et al.*, 2013).

Filière biocarburant	Rendement biomasse t/ha	Rendement biocarburant	
		Volumique (l/ha)	Énergétique (GJ/ha)
<i>1^{re}</i>			
Biodiesel de coco	2.1–2.4 (cop)	500–600	17.3–20.8
Biodiesel de tournesol	1.5–2.4 (gr.)	680–1100	23.4–37.2
Biodiesel de soja	2.6–3.6 (gr.)	450–610	15.8–21.4
Biodiesel de colza	1.5–3.64 (gr.)	690–1560	23.4–52.8
Biodiesel de graine de coton	1.3–1.7 (gr.)	260–340	9.0–11.8
Biodiesel de jatropha	0.8–2 (gr.)	240–600	8.2–20.4
Biodiesel de palme	7–15 (gr.)	3500–7500	121.8–261.0
Éthanol de blé	6.7–8.3	2510–2990	53.4–63.6
Éthanol de maïs	6–8.7	2160–3130	46.0–66.6
Éthanol de betterave	56.4–84	3200–4800	68.1–102.2
Éthanol de canne à sucre	50–85	3500–6500	74.5–138.3
Éthanol de sorgho	92	5000	106.4
<i>2^e</i>			
Éthanol de paille de blé	3.2–6.0 (ms)	1200–2270	25.6–48.3
Éthanol cultures pérennes	12.3 (ms)	4060	86.4
Biodiesel FT d'eucalyptus	20 (ms)	3000–5000	103.2–172.0
Méthanol d'eucalyptus	20 (ms)	9000–11000	140–172
DME d'eucalyptus	20 (ms)	10000	188
Biodiesel de bagasse	11 (ms)	1650–2750	56.8–94.6

gr : graines ; dr : drupe ; ms : matière sèche. ^{1, 2}À partir des co-produits issus respectivement des surfaces de blé et canne à sucre.

Tableau 3. Surfaces nécessaires à la production d'un m³ ou d'une tep de biocarburants de première et seconde générations . Reprise du [tableau 2 \(COI, rapport 2019\)](#).

Filière biocarburant	Surface nécessaire pour 1 m ³ de biocarburant	Surface nécessaire de biocarburant pour 1 tep/(pour 1 TJ)
	En hectare (ha)	En hectare (ha)
<i>1^{re}</i>		
Biodiesel de coco	1.67–2	2.0–2.42/(47,8–57,8)
Biodiesel de tournesol	0.91–1.47	1.12–1.80/(26,7–43,0)
Biodiesel de soja	1.67–2.22	1.95–2.65/(46,6–63,3)
Biodiesel de colza	0.64–1.45	0.80–1.80/(15,3–43,0)
Biodiesel de graine de coton	2.94–3.85	3.54–4.64/(84,6–92,0)
Biodiesel de jatropha	1.67–4.17	2.50–5.10/(59,7–121,8)
Biodiesel de palme	0.13–0.29	0.16–0.34/(3,8–8,1)
Ethanol de blé	0.33–0.40	0.66–0.78/(15,8–18,6)
Éthanol de maïs	0.32–0.46	0.63–0.91/(15,0–21,7)
Éthanol de betterave	0.21–0.31	0.41–0.61/(9,8–14,6)
Éthanol de canne à sucre	0.15–0.29	0.30–0.56/(7,2–13,4)
Éthanol de sorgho	0.2	0.39/(9,3)
<i>2^e</i>		
Éthanol de paille de blé1	0,44–0,83	0,87–1,63/(20,8–38,9)
Éthanol cultures pérennes	0,25	0,48/(11,5)
Biodiesel FT d'eucalyptus	0,20–0,33	0,24–0,41/(5,7–9,8)
Méthanol d'eucalyptus	0,09–0,11	0,24–0,30/(5,7–7,2)
DME d'eucalyptus	0,1	0,22/(5,2)
Biodiesel de bagasse2	0,36–0,61	0,44–0,74/(10,5–17,7)

*1 tep = 41.8 GJ. ^{1, 2}À partir des co-produits issus respectivement des surfaces de blé et de canne à sucre.

Tableau 4. Facteur d'émission des biocarburants issus des différentes voies de production.

	Facteur d'émission gCO ₂ eq/MJ	Plage de variation CAS indirect gCO ₂ eq/MJ
<i>1^{re}</i>		
Diesel	83,8 ⁽²⁾	
Ethanol	37 ⁽¹⁾	10–170 ⁽³⁾
Biodiesel EMVH*	32,3 ⁽¹⁾	40–80 ⁽³⁾
<i>2^e</i>		
Biodiesel FT	3–7 ⁽²⁾	0–16 ⁽³⁾
Éthanol cellulosique	5–11 ⁽²⁾	10–70 ⁽³⁾
<i>3^e</i>		
Biodiesel microalgues	22–33 ⁽¹⁾	n.a.
HAU et graisses animales	0 ⁽⁴⁾	1,3–10 ⁽⁴⁾

*Esters méthyliques d'huiles végétales. HAU: huiles alimentaires usagées. ¹ADEME, 2020; ²IRENA, 2016; ³Commission européenne, 2017; ⁴EU, Directive 2018/2001, 2018.

intégrer les changements d'affectation des sols dans le résultat de référence (ADEME, 2020)».

Pour les biocarburants de deuxième génération et ceux dits « avancés », exprimée en GES en grammes-équivalent CO₂ par MJ de biocarburant, la performance environnementale montre une réduction des émissions de GES de 50 % et 60 % par rapport à une valeur de référence de carburant fossile de 83,8 gCO₂eq/MJ. Les améliorations des émissions de GES sont dues à une meilleure efficacité de conversion, les émissions de GES associées aux filières avancées des biocarburants sont de 3 à 33 gCO₂eq/MJ. Ces voies permettent une réduction d'au moins 60 % par rapport à la référence fossile. Les voies de gazéification utilisant les résidus forestiers comme matière première produisent les émissions les plus faibles à 3–7 gCO₂eq/MJ.

En effet, les émissions associées à la matière première sont très faibles et les usines de conversion sont supposées être autosuffisantes en énergie. Les voies d'hydrolyse, de fermentation et de pyrolyse rapide produisent également de très faibles émissions à 11–21 gCO₂eq/MJ. Certaines émissions supplémentaires résultent d'entrées d'enzymes, de produits chimiques et d'énergie externe. Cependant, ceux-ci pourraient diminuer à 22 gCO₂eq/MJ à long terme. La transestérification de l'huile de micro-algues produit également des émissions d'environ 33 gCO₂eq/MJ. Le [tableau 4](#) est une illustration des facteurs d'émission retenus pour la production des différents biocarburants.

Pour les CAS indirects, des valeurs précises sont difficiles à établir. La bibliographie montre des variations importantes, allant de 1 à 100 et même 400 gCO₂eq/MJ pour un même biocarburant selon les modèles utilisés. Cependant, le niveau élevé d'incertitude et le manque de convergence dans les évaluations des CAS indirects ne signifient pas que les études n'ont aucune valeur scientifique ou politique. Par ailleurs, on remarque que les HAU et graisses animales présentent des

valeurs significativement réduites. Elles illustrent l'intérêt de la valorisation des résidus parmi les biocarburants d'avenir.

4 Filières biodiesel d'avenir

Un certain nombre de projets réévaluent la disponibilité et l'impact environnemental des matières premières pour les biocarburants, pendant que la R&D en Europe se concentre sur des technologies de deuxième génération utilisant des huiles et graisses usagées, des résidus agricoles, de la biomasse forestière ou des cultures énergétiques qui peuvent être cultivées sur des terres marginales, avec des besoins moindres en engrais et autres intrants. Les deux premiers cités apparaissent alors particulièrement intéressants puisque ne nécessitant pas de surfaces dédiées.

4.1 Les filières basées sur la valorisation de résidus

Celles-ci représentent 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 alors un impact environnemental réduit puisque celui-ci se limite à l'effet éventuel de leur prélèvement et de la logistique de collecte (bien qu'il faille considérer leur apport au sol ainsi détourné, de même que la compétition d'usage des pailles dans l'élevage par exemple). De plus, ce type de ressources ne nécessite pas spécifiquement de surfaces, ainsi sa mobilisation n'induit pas de CAS, écueil essentiel de la première génération. Toutefois, 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.

4.2 Biocarburant B-100/FABE

Des perspectives intéressantes de biodiesel « plus verts » se dégagent avec les résidus d'huiles alimentaires (huiles alimentaires usagées [HAU]) et de graisses animales. Selon le système européen du « double-comptage » (Ministère de la Transition Ecologique, 2019), la filière de production du biodiesel à partir d'huiles alimentaires usagées et de graisses animales montre un niveau de réduction des émissions de gaz à effet de serre (sans tenir compte de CAS) entre 83–90 % contre celui d'un biodiesel classique d'oléagineux de 60 à 80 % (ADEME, 2019; EU Directive 2018/2001) par rapport à un carburant diesel. Ce système de l'UE milite en faveur des esters méthyliques d'huile animale lors du calcul de leur incorporation dans le carburant d'origine fossile (Greenea, 2016). On enregistre en France à l'usine Estener au Havre la transformation de 110 000 tonnes par an de graisses animales CAT 1/2 française (JO UE, 2009; Agence canadienne d'inspection, 2009). Ce qui représente une capacité de production de 75 000 tonnes de biodiesel et une capacité de production de 7 500 tonnes de glycérine. À l'échelle européenne, la capacité de production est de 200 000 tonnes de ce biodiesel « vert ».

La valorisation des déchets issus d'abattoirs devient alors une opportunité pour les biocarburants de deuxième génération et pour l'oléochimie à faible empreinte carbone

⁵ Changement d'affectation des sols

Tableau 5. Propriétés principales de B-100/FABE comparées à celles des carburants diesel, biodiesel commercialisé et HVO.

Carburants	Teneur en fame ¹ %	Densité à 20°C (kg/m ³)	Viscosité 40°C (mm ² /s)	Point éclair (°C)	Indice de cétane	PCI ^{4,5} MJ/kg
EU norme biodiesel B100 (EN 14214)	> 96.5	860–900	3.5–5.0	> 120	> 51	Non spec
Diesel	0	815	2.95	70	52	42–44
Biodiesel B7 ²	7	832.4	3.24	59	56.5	43
HVO ^{2,4,5}	0	778.7 (à 60°C)	2.82	83	76 –80	34–44
B-100 ³ (100% FABE ¹)	0	903.4	7.39	74.5	63.0	38–42 ⁵

¹FAME: *Fatty Acids Methyl Esters*; FABE: *Fatty Acids Butyl Esters*; HVO: *Hydrotreated Vegetable Oil*.

Sources: ²Dimitriadis *et al.*, 2018; ³Wallis *et al.*, 2017; ⁴Garrain *et al.*, 2014; ⁵Gao *et al.*, 2019 et cette étude.

du futur. En effet, l'étude d'un procédé intégré couplant la production de biodiesel et la méthanisation des sous-produits animaux a conduit à la mise au point séquentielle du biocarburant B-100/FABE* puis au fractionnement des biomolécules le constituant pour des besoins de l'oléochimie du futur. Il s'avère que le fractionnement et la caractérisation des milieux lipidiques liquides à partir des graisses de flottaison a révélé des fractions lipidiques constituées par des compositions chimiques saturées (acides palmitique, stéarique) et monoinsaturés (acide oléique) perdues dans des eaux résiduaires. Selon les résultats obtenus, les solvants d'extraction protiques hydrophobes se sont révélés efficaces. Le butan-1-ol a montré sa capacité à l'extraction sélective des lipides dans ces eaux résiduaires. Il s'intercale comme co-tensioactif dans les micelles directes et/ou inverses formées par l'acide dodécyl benzène sulfonique avec l'huile de récupération. L'acide dodécyl benzène sulfonique est utilisé ensuite en tant que catalyseur et tensio-actif *in situ*. Il est très efficace pour réaliser la réaction de transfert d'acyle des glycérides en esters butyliques d'acides gras avec des rendements très élevés (Wallis *et al.*, 2017). L'efficacité procurée par le butan-1-ol amène à positionner les esters butyliques d'acides gras (*FABE) par rapport aux esters méthyliques (FAME) et éthyliques (FAEE) issus respectivement du méthanol et de l'éthanol couramment utilisés dans les applications énergétiques. Dans le tableau 5, nous avons répertorié les propriétés principales de ce B-100/FABE, comparées à celles des carburants commerciaux diesel, biodiesel, et celles de l'HVO (*hydrotreated vegetable oil*) en émergence. L'indice de cétane du B-100/FABE est significativement plus élevé que ceux des diesels et biodiesels du marché et se rapproche de celui de l'HVO (Dimitriadis *et al.*, 2018). De plus, selon Sanchez *et al.* (2014), les esters butyliques d'acides gras FABE peuvent être, comme les FAME, acceptés à 100 % dans les moteurs diesel. En termes de teneur en carbone renouvelable, ce nouveau biocarburant, issu des gisements des triglycérides des huiles de récupération et de bio-butanol, est constitué de 100 % de carbone totalement biosourcé.

Utilisés selon la norme européenne EN 14214, les esters butyliques se caractérisent par un haut indice de cétane de 63,0 contre 52,0 pour ceux du biodiesel et du diesel. Cette technologie offre l'opportunité de revendiquer les avantages d'un biocarburant relevant d'un cycle vertueux de l'économie circulaire: nouvelle matière première abondante et à coût négatif transformée par un nouveau procédé performant dans un

réacteur multitâche permettant l'extraction et la distillation réactive sans limitation de transfert d'énergie et de masse par la présence d'eaux résiduaires et de la réaction de transfert d'acyle conduisant aux esters butyliques biocarburants B-100/FABE.

4.3 Diesel-éthanol-additifs polyfonctionnels oxygénés

Bien que n'étant pas *a priori* destiné à la carburation des moteurs diesels, l'éthanol voit croître un intérêt en mélange dans les gazoles (Emiroglu et Mehmet, 2018). Satgé de Caro *et al.* (2001) ont montré que les mélanges gazole-éthanol peuvent être utilisés dans le moteur diesel à condition de les rendre compatibles. Le squelette glycérol permet l'élaboration de deux structures alkyloxy propanolamines et de leurs dimères. Ils se caractérisent par la capacité des groupes hydroxyl OH et amine NH de former des liaisons hydrogène intra moléculaires et intermoléculaires et d'exalter la cohésion entre l'éthanol anhydre et le diesel dans des micro-émulsions. L'adjonction de ces additifs polyfonctionnels oxygénés s'effectue dans des teneurs de 1% chacun au mélange diesel + éthanol 15%. Soit un carburant constitué de diesel + 15–20% éthanol + 2% d'additifs, permet de répondre aux caractéristiques d'un carburant super oxygéné de façon originale par l'éthanol et les additifs polyoxygénés. Ces additifs polyfonctionnels agissent à la fois en tant que tensioactifs et lubrifiants moteur en réduisant les tensions entre le diesel et l'éthanol et entre le fluide et le métal dans les moteurs à injection directe et indirecte. L'impact est la réduction des émissions des polluants CO et NOx par rapport au diesel pur.

4.4 Les filières basées sur l'exploitation de cultures dédiées

Avec l'intérêt renouvelé pour la biomasse, les résidus n'attirent pas seulement l'attention 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.

Du fait de ces limites quantitatives des résidus valorisables en carburants, 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. Les cultures aujourd'hui identifiées, telles que les taillis forestiers à courte ou très courte rotation (TCR ou TTCR)⁴ 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. Mais la menace du changement climatique amène à s'assurer que de nouveaux génotypes soient disponibles possédant une utilisation efficace de l'eau et qu'une gestion à l'échelle du bassin versant soit en place pour sécuriser ces ressources à l'avenir (Rowe *et al.*, 2019).

Mais 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 (Pedroli *et al.*, 2013).

5 Conclusions

Les biodiesels de première génération offrent un potentiel de substitution des carburants fossiles d'environ 10 % à l'échelle mondiale, pendant que celui attribué aux filières de deuxième génération se tiendrait autour de 27 %. Les premières générations sont décriées, encore que cela soit discutable en usage local, tout comme, dans une moindre mesure, ceux de deuxième génération à cause de bilans environnementaux moins favorables que leur caractère renouvelable pouvait laisser attendre. Une grande part des critiques repose sur l'impact sur le CAS (changement d'affectation des sols) qui peut se révéler important dans certains cas, bien que, par exemple, le biodiesel d'huile de palme offre un peu de plus de 6 tep (tonne équivalent pétrole), soit 251 GJ, par hectare et celui issu biodiesel FT d'eucalyptus 4 tep (167 GJ) par hectare, ce qui relativise complètement cette approche.

Les biodiesels basés sur des cultures dédiées conduisent à des impacts environnementaux plus réduits que les cultures de première génération mais sont eux aussi concernés par la problématique des CAS.

En comparaison, les filières basées sur la valorisation de résidus n'entrent pas dans les enjeux de CAS et montrent des niveaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre entre 83–90 % alors que celui d'un biodiesel classique « colza » est de 60 à 80 % par rapport à un carburant diesel. Ainsi, les esters butyliques d'huiles alimentaires usagées et de graisses animales tout en s'affichant comme des biodiesels « plus verts » représentent une opportunité pour l'avenir des biocarburants et pour une oléochimie plus verte.

⁴ Cultures lignieuses et pérennes à usage énergétique. C'est une forme extrême du traitement en « taillis simple », conçue pour une récolte fortement mécanisée, avec une rotation de 3 à 5 ans (taillis très courte rotation ou TTCR), ou tous les 8 à 15 ans (TCR).

Références

- ADEME. 2019. Produire des biocarburants de première génération : impacts, 2019. Available from: <https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-l'action/produire-biocarburants/dossier/produire-biocarburants-premiere-generation/impacts> (last consult: 2020/10/04).
- ADEME. 2020. Documentation base carbone, 2020. Available from: https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?liquides2.htm (last consult: 2020/10/04).
- ADEME. 2011. Feuille de route biocarburants avancés. Available from: <https://www.ademe.fr/feuille-route-biocarburants-avances> (last consult: 2020/10/04).
- Agence canadienne d'inspection des aliments. 2009. Available from: <https://inspection.gc.ca/sante-des-animaux/animaux-terrestres/exportation/politiques-d-exportation/2009-9/fra/1321202144060/1321202222038> (last consult: 2020/10/04).
- Benoist A, Van de Steene L, Broust F, Helias A. 2012. Enjeux environnementaux du développement des biocarburants liquides pour le transport. *Sciences, Eaux et Territoires* 7: 66–73. <https://www.cairn.info/revue-sciences-eaux-et-territoires-2012-2-page-66.htm>.
- Berndes G, Ahlren S, Börjesson P, Cowie AL. 2013. Bioenergy and land use change—state of the art. *WIREs Energy Environment* 2: 282–303. DOI: 10.1002/wene.41.
- Brennan L, Owende Ph. 2010. Biofuels from algae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biodiesel and co-products. *RSER* 14: 557–577.
- Broust F, Girard P, Van de Steene L. 2013. Biocarburants de seconde génération et bioraffinerie. In : *Techniques de l'ingénieur. Bioprocédés*, 17 p. Available from: http://publications.cirad.fr/une_no_tice.php?dk=567996.
- Cherubini F. 2010. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*. doi:10.1016/j.enconman.2010.01.015.
- Chisti Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25: 294–306.
- COI. 2019. Analyse synthétique des filières de biocarburants avancés. In: *Étude du potentiel des biocarburants dans les États membres de la Commission de l'Océan Indien*. Available from: <https://www.commissionoceanindien.org/wp-content/uploads/2019/08/Biocarburants-final-with-Cover.pdf> (last consult: 2020/10/04).
- Commission européenne. 2017. Study Report on Reporting Requirements on Biofuels and Bioliqids Stemming from the Directive (EU) 2015/1513. Available from: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20170816_iluc_finalstudyreport.pdf (last consult: 2020/10/04).
- De Lattre-Gasquet M, Vermersch D, Bursztyn M, Duée PH. 2010. Quelles questions éthiques posent la production de palmier à huile et la recherche sur les biocarburants ? *OCL* 17(6). Available from: https://agritrop.cirad.fr/558640/1/document_558640.pdf.
- Dimitriadis, *et al.* 2018. Evaluation of a hydrotreated vegetable oil (HVO) and effects on emissions of a passenger car diesel engine. *Front Mech Eng* 4: 7. <https://doi.org/10.3389/fmech.2018.00007>.
- Directive (UE) 2015/1513 du Parlement Européen et du Conseil. 2015. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L1513&from=EN> (last consult: 2020/10/04).
- DIRECTIVE (UE) 2018/2001 du Parlement Européen et du Conseil. 2018. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=FR> (last consult: 2020/10/04).
- Emiroglu O, Mehmet S. 2018. Combustion, performance and emission characteristics of various alcohol blends in a single

- cylinder diesel engine. *Fuel* 212: 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.016>.
- Enamala MK, Enamala S, Chavali M, *et al.* 2018. Production of biofuels from microalgae – A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. *RSER* 94: 49–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.012>.
- ETIP Bioenergy. 2020. Current status of Advanced Biofuels demonstrations in Europe. ETIP Bioenergy Working Group 2 and ETIP-B-SABS2 project team. Final version 09/03/2020. Available from: https://www.etipbioenergy.eu/images/ETIP-B-SABS2_WG2_Current_Status_of_Adv_Biofuels_Demonstrations_in_Europe_Mar2020_final.pdf (last consult: 2020/10/04).
- Gao Y, Chen Y, Gu J, Xin Z, Sun S. 2019. Butyl-biodiesel production from waste cooking oil: Kinetics, fuel properties and emission performance. *Fuel*, 236 (2019) 1489–1495. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.015>.
- Garran D, Herrera I, Yolanda Lechon Y, Lago C, Saez R. 2010. Renewable Diesel Fuel from Processing of Vegetable Oil in Hydrotreatment Units: Theoretical Compliance with European Directive 2009/28/EC and Ongoing Projects in Spain. *Smart Grid and Renewable Energy* 1(2). DOI: [10.4236/sgre.2010.12011](https://doi.org/10.4236/sgre.2010.12011).
- Greena. Available from: <http://www.greena.com/fr/convictions/> (last consult: 2020/10/04).
- Haifeng L, Bin H, Chao J. 2016. Effects of different alcohols additives on solubility of hydrous ethanol/diesel fuel blends. *Fuel* 184(15): 440–448. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.037>.
- International Energy Agency (IEA), KWES. 2020. Available from https://webstore.iea.org/download/direct/4093?fileName=Key_World_Energy_Statistics_2020.pdf (last consult: 2020/10/04).
- International Energy Agency (IEA), Transport Biofuels. 2020. Available from <https://www.iea.org/reports/transport-biofuels> (last consult: 2020/10/04).
- IFPEN. 2015. Quel avenir pour les biocarburants? Available from: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/quel-avenir-les-biocarburents> (last consult: 2020/10/04).
- IRENA, Innovation Outlook Advanced Biofuels. 2016. Available from: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Innovation_Outlook_Advanced_Liquid_Biofuels_2016.pdf
- Journal Officiel de l'Union européenne, règlement (CE) n° 1069/2009. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:300:0001:0033:FR:PDF> (last consult: 2020/10/04).
- Kandaramath TH, Yakoob Z, Binitha NN. 2015. Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges. *RSER* 42: 1234–1244.
- Kargbo H, Harris JH, Phan AN. 2021. Drop-in fuel production from biomass: critical review on techno-economic feasibility and sustainability. *RSER* 135: 110168.
- Karmakar A, Karmakar S, Mukherjee S, 2010. Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Biore-source Technology* 101: 7201–7210.
- Mathimani T, Baldinelli A, Rajendran K, Prabakar D, Matheswaran M, Van Leeuwen RP, Pugazhendhi A. 2019. Review on cultivation and thermochemical conversion of microalgae to fuels and chemicals: process evaluation and knowledge gaps. *Journal of Cleaner Production* 208: 1053–1064.
- Ministère de la Transition Ecologique. 2019. Guide pratique, 2019. Mise en œuvre du double comptage pour les biocarburants et bioliquides. Available from: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide%20double%20comptage%202019.pdf> (last consult: 2020/10/04).
- Mohanty SK, Swain MR. 2019. Bioethanol production from corn and wheat: food, fuel and future. In: Bioethanol production from food crops, chapter 3. pp. 45–75. DOI: [10.1016/C2017-0-00234-3](https://doi.org/10.1016/C2017-0-00234-3).
- Naik SN, Goud VV, Rout PK, Dalai AK. 2010. Production of first and second generation biofuels: a comprehensive review. *RSER* 14: 578–597.
- Pandit R, Fulekar MH. 2019. Biodiesel production from microalgal biomass using CaO catalysts synthesized from natural waste material. *Renewable Energy* 136: 837–845. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.047>.
- Pedroli B, Elbersen B, Frederiksen P, *et al.* 2013. Is energy cropping in Europe compatible with biodiversity? Opportunities and threats to biodiversity from land-based production of biomass for energy purposes. *Biomass and Bioenergy* 55: 73–86.
- Pioch D, Vaitilingom G. 2005. Palm oil and derivatives: fuels or potential fuels? *OCL* 12(2): 161–169.
- Razzak SA, Hossain MM, Lucky RA, Basi AS, de Lasa H. 2013. Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by micro algae culturing – A review. *RSER* 27: 622–653.
- Rowe RL, Street NR, Taylor G. 2019. Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK. *RSER* 13: 271–290. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.07.008>.
- Singh D, Sharma D, Soni SL, Sharma S, Sharma PK. 2020. A review on feedstocks, production processes and yield for different generations of biodiesel. *Fuel* 262: 116553.
- Singh SP, Singh D. 2010. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review. *RSER* 14: 200–216. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.017>.
- Sanchez *et al.* 2014. A comparative study of the production of esters from Jatropha oil using different short-chain alcohols: Optimization and characterization. *Fuel* 143(2015): 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.064>.
- Satgé de Caro P, Mouloungui Z, Vaitilingom G, Berge JC. 2001. Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for use in diesel engines. *Fuel* 80: 565–574.
- Wallis C, Cerny M, Lacroux E, Mouloungui Z. 2017. Effect of water and lipophilic alcohols or amines on the 4-dodecylbenzenesulfonic acid catalyzed esterifications, trans-esterifications and amidations. *Eur J Lipid Sci Technol* 119(9): 1600483. DOI: [10.1002/ejlt.201600483](https://doi.org/10.1002/ejlt.201600483).
- Wallis C, Cerny M, Lacroux E, Mouloungui Z. 2017. Recovery of slaughterhouse Animal Fatty Wastewater Sludge by conversion into Fatty Acid Butyl Esters by acid-catalyzed esterification. *Waste Management* 60: 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.003>.
- Wu Y, Zhang X, Zhang Z, *et al.* 2020. Effects of diesel-ethanol-THF blend fuel on the performance and exhaust emissions on a heavy-duty diesel engine. *Fuel* 271: 117633. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117633>.

Citation de l'article : Vaitilingom G, Mouloungui Z, Benoist A, Broust F, Daho T, Piriou B. 2021. Vers une génération plus « verte » de biodiesels. *OCL* 28: 2.