

Énergies renouvelables

LES BIOCARBURANTS LIQUIDES DANS LES TRANSPORTS

Les pressions environnementales et économiques encouragent le développement des énergies renouvelables, notamment dans les transports. Les biocarburants représentent une des réponses possibles à ces pressions. Mais comment sont produits les biocarburants actuels et à venir ? Quelles sont leurs perspectives d'avenir ? Quels sont les risques professionnels liés à ces nouveaux procédés biotechnologiques ?

LIQUID BIOFUELS IN TRANSPORT – Environmental and economic pressures are encouraging the development of renewable energies, in particular in the transport industries. Biofuels constitute a possible response to such pressures. But how are biofuels currently produced and how will they be produced in the future? What are their prospects for the future? What occupational risks are related to these new biotechnological processes?

CHRISTINE
DAVID
INRS,
département
Expertise
et conseil
technique

Diminution des ressources en énergie fossile, fluctuation des cours du pétrole, augmentation des gaz à effet de serre (GES) : tout concourt au développement des énergies renouvelables telles que le solaire, l'éolien ou la biomasse (matière première d'origine végétale, animale ou issue de déchets).

La biomasse permet en effet de produire des biocarburants liquides utilisés dans les transports. Riche en sucres, elle est employée pour produire les bioéthanol, alors que la biomasse oléagineuse (riche en huiles) est à l'origine des biodiesels. Ces biocarburants liquides sont généralement incorporés dans des carburants d'origine fossile. Ainsi, l'éthanol ou son dérivé l'ETBE (éthyltertiobutyléther) sont incorporés à l'essence et les EMAG (esters méthyliques d'acides gras) sont incorporés au diesel ou au kérosène.

On distingue trois générations de biocarburants, selon l'origine de la biomasse :

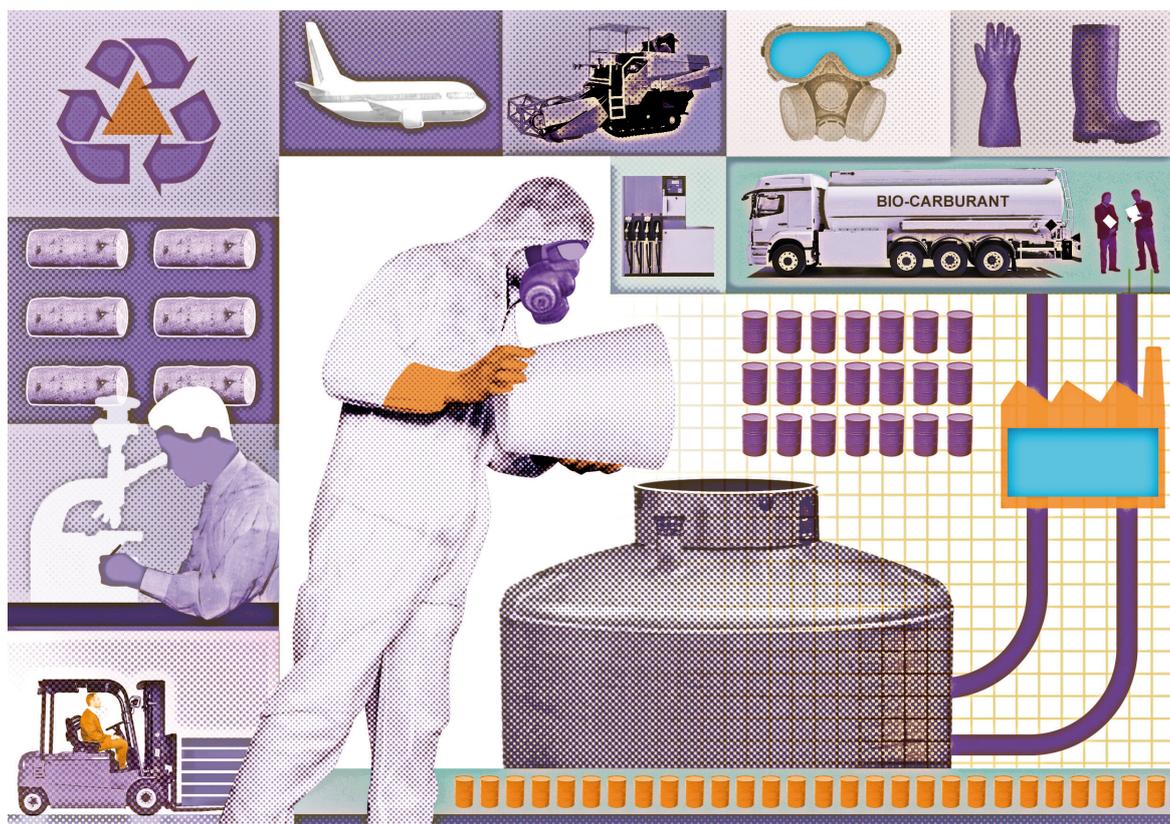
- les biocarburants de première génération, actuellement commercialisés, sont produits à partir de la fraction comestible des végétaux ou d'huiles usagées, au moyen de procédés chimiques ou biologiques. Les cultures correspondantes sont alors détournées de la filière alimentaire ;
- les biocarburants de deuxième génération, en début d'industrialisation, proviennent de la partie non comestible des végétaux, au moyen de procédés chimiques ou biologiques. Il n'y a plus de compétition avec la filière alimentaire ;

- les biocarburants de troisième génération, en cours de développement, seront produits par des micro-organismes.

Biocarburants de première génération

Le bioéthanol est produit à partir de plantes riches en sucre (canne à sucre, betterave à sucre) ou riches en amidon (maïs, blé, pomme de terre). Dans le premier cas, les plantes sont mises à fermenter dans des bioréacteurs contenant des micro-organismes qui transforment le sucre en éthanol. Dans le second cas, l'amidon est facilement séparé des autres composants et dégradé en sucres simples. Ces derniers sont alors fermentés par des micro-organismes pour produire de l'éthanol, récupéré par distillation. Cet alcool est peu compatible avec la majorité des moteurs à essence. Il est donc transformé par réaction catalytique avec de l'isobutène (produit pétrolier) pour produire de l'ETBE, qui est incorporé à l'essence à un taux pouvant aller jusqu'à 15%.

Les plantes riches en huile, comme le colza, le soja, le tournesol ou le palmier à huile, mais également les huiles animales ou les huiles de cuisson usagées, sont employées pour produire du biodiesel. En France, les huiles végétales pures (HVP) sont autorisées comme carburant uniquement pour certains secteurs professionnels fixés par le Code des douanes (les exploitants agricoles, les pêcheurs professionnels, les collectivités territoriales ou leurs groupements). L'utilisation des HVP suscite beaucoup de réserves de la part des constructeurs



© Nini La Caille pour l'INRS

de véhicules automobiles et de machines agricoles, dont la grande majorité déconseille leur usage [1]. Les huiles sont trop visqueuses, difficilement auto-inflammables et contiennent du glycérol qui, lors de sa décomposition, forme de l'acroléine hautement toxique.

Les huiles subissent donc un traitement chimique (transestérification, hydrogénation) pour les rendre compatibles avec les moteurs actuels. Le méthanol étant le plus souvent utilisé, les transestérifications produisent des EMAG (esters méthyliques d'acides gras), des EMHV (esters méthyliques d'huiles végétales), des EMHA (esters méthyliques d'huiles animales) ou encore des EMHU (esters éthyliques d'huiles usagées). Ces substances sont mélangées, à raison de 10 à 30% du volume final de diesel.

Cependant, en Allemagne, Autriche et Suède, des moteurs ont été mis au point pour fonctionner avec du biodiesel non mélangé au diesel traditionnel.

Par ailleurs, des essais sont en cours pour tester le biokérosène dans l'aviation civile. En octobre 2014, Air France a annoncé que les avions assurant la ligne Toulouse-Paris utiliseront du biocarburant, une fois par semaine, jusqu'en septembre 2015. La simple adjonction de 10% de biocarburant au kérosène d'origine fossile permettrait de réduire de 80% l'émission des GES [2].

Au niveau mondial, l'essentiel des biocarburants fabriqués sont des bioéthanol produits aux États-Unis (à partir de maïs) et au Brésil (à partir de

canne à sucre). Selon l'OCDE, en 2012, 98 milliards de litres d'éthanol ont été produits dans le monde (70% par les États-Unis et le Brésil). Cette même année, 25 milliards de litres de biodiesel étaient produits, pour 40% par l'Europe.

La France est le leader européen de la production de biocarburant de première génération [3] et se situe au quatrième rang mondial des producteurs de biodiesel [4].

Biocarburants de deuxième génération

L'éthanol de deuxième génération est produit à partir de biomasses lignocellulosiques: cultures dédiées (arbres à croissance rapide comme le saule ou le peuplier, herbacées comme le miscanthus, la luzerne), résidus de bois, bagasse de canne à sucre, paille, tiges et feuilles... Le procédé de production s'en trouve complexifié. En effet, les molécules de départ (cellulose, hémicellulose, lignine) sont étroitement liées pour former la structure rigide des plantes et sont, par là même, très difficiles à séparer. C'est pourquoi la biomasse subit un pré-traitement thermochimique qui sépare ses composants. Dans un second temps, des enzymes (comme les cellulases issues, par exemple, de la moisissure *Trichoderma reesei*) coupent la cellulose et l'hémicellulose en sucres simples. Finalement, ces sucres sont transformés en éthanol par des micro-organismes cultivés en masse dans des bioréacteurs. L'important travail de recherche, actuellement mené par les entreprises du secteur, consiste à



développer le procédé le plus souple possible, pouvant s'adapter aux variations de matières premières, dont la composition lignocellulosique diffère. En effet, chaque matière première est dégradée de façon optimale par un complexe enzymatique spécifique. Les entreprises sont donc amenées à cultiver en masse des micro-organismes qui produisent naturellement les enzymes d'intérêt ou des micro-organismes génétiquement modifiés pour le faire¹. Une fois trouvé le mélange enzymatique pouvant s'adapter aux différentes biomasses, les entreprises de production pourront se déployer dans des bassins agricoles très variés, s'adapter à l'approvisionnement en biomasse fluctuant selon les saisons et, enfin, limiter les transports de matières premières (et par voie de conséquence, l'émission de GES).

D'autres études portent sur des bactéries « couteau suisse » qui pourraient accomplir à elles seules plu-

projets apparaissent dans le monde. À la fin de l'année 2013, une première usine a vu le jour dans le Nord de l'Italie, avec pour ambition de produire 40 000 tonnes de bioéthanol par an. En France, des sites de production de biocarburant de deuxième génération se développent progressivement.

Biocarburants de troisième génération

Les biocarburants de troisième génération sont au stade de recherche et développement. Ils seront produits par des micro-organismes (bactéries, levures, moisissures, micro-algues) génétiquement modifiés ou non, pouvant parfois se nourrir d'eaux usées. Les biocarburants de troisième génération présentent *a priori* plus d'avantages que de contraintes (Cf. Tableau 1) et font l'objet de nombreux projets de recherche.

L'un d'eux consiste à modifier la bactérie *Escherichia coli* en lui insérant des gènes pour qu'elle puisse casser la grosse molécule d'alginate² et la transformer en éthanol. Reste à régler une difficulté qui apparaîtra au stade industriel: l'éthanol est toxique pour la bactérie à partir d'une certaine concentration [7].

Une grande partie des projets concerne la production de biodiesel. Pour cela, le choix des micro-organismes éligibles est très étendu [8]:

- les bactéries oléagineuses (particulièrement les actinomycètes) peuvent synthétiser et accumuler, dans leurs cellules, de forts taux d'acides gras: de 20 à 40% de leur poids sec;
- les levures oléagineuses (*Candida*, *Cryptococcus*...) peuvent accumuler 40% de leur poids sec en lipides, voire 70% lorsqu'elles sont en condition de stress;
- les moisissures (*Absidia*, *Cunninghamella*...) peuvent accumuler des acides gras de type oléique, linoléique, palmitique, palmitoléique;
- les micro-algues comme *Chlorella*, *Neochloris oleoabundans* ou *Nannochloropsis* présentent naturellement des taux élevés en lipides (30 à 60% de leur poids sec).

Les micro-algues représentent, pour de nombreux chercheurs, les meilleurs candidats pour la production de biodiesel dans le respect de la politique de baisse des GES. En effet, elles tirent leur énergie de la lumière grâce à la photosynthèse, consomment le CO₂ en solution dans l'eau et produisent des lipides, des hydrates de carbone et de l'O₂. On assiste donc, depuis quelques années, à une ruée vers l'océan, le nouvel Eldorado des entreprises cherchant des micro-algues performantes, au sein d'une biodiversité estimée entre 200 000 et un million d'espèces.

Les micro-algues peuvent être cultivées en milieu ouvert sur des surfaces étendues, en *raceway* (bassin circulaire) ou encore en cuve. Les deux derniers sont des systèmes peu profonds (quelques

AVANTAGES	CONTRAINTES
Non-compétition avec culture alimentaire: les micro-organismes peuvent se cultiver sur des terres non arables	Consommation de nutriments et d'eau douce (sauf micro-algues marines)
Dégradation possible des déchets	Coût énergétique (brassage, lumière, chaleur)
Croissance rapide (jusqu'à 10 fois plus que les plantes terrestres)	Coût de récolte et de traitement de la biomasse algale
Rentabilité à l'hectare des micro-algues multipliée par 30 par rapport aux cultures d'oléagineux terrestres	
Non-consommation des ressources d'eau douce par les micro-algues marines	
Consommation de CO ₂ par les micro-algues	
Résidus algaux parfois utilisables pour l'alimentation ou d'autres productions	

↑ TABLEAU 1
Avantages et contraintes des micro-organismes cultivés pour produire des biocarburants de troisième génération.

sieurs étapes. Par exemple, la bactérie *Deinococcus* serait capable de réaliser les deux dernières étapes de la production de biocarburant (couper la cellulose et l'hémicellulose en sucres et transformer ceux-ci en alcool) [5].

Les biodiesels de deuxième génération sont obtenus en transformant la biomasse par pyrolyse ou par torréfaction, pour éliminer l'eau, puis par gazéification à haute température, pour obtenir un gaz de synthèse (CO et H₂). Celui-ci est transformé par catalyse afin de produire un hydrocarbure, proche du diesel fossile (voie de synthèse BtL, pour *biomass to liquid*).

La production de biocarburant de deuxième génération nécessite encore un peu de recherche et beaucoup de développement. Toutefois, les années 2010 ont vu le démarrage de bioraffineries de deuxième génération, aux États-Unis et au Brésil, produisant plus de 300 000 t/an [6]. Plusieurs dizaines de

dizaines de centimètres) avec circulation en boucle de l'eau, agitée par bullage ou roue à aube. Ces cultures en milieu ouvert présentent le double inconvénient d'avoir un faible rendement et d'être facilement contaminées par les micro-organismes de l'environnement. Les micro-algues peuvent également être cultivées en milieu clos, dans des photobioréacteurs: tubes transparents, en plastique ou en verre, possédant une source de lumière naturelle ou artificielle. Le milieu clos évite les contaminations, mais les coûts sont plus importants qu'en bassin ouvert. Les rendements s'améliorent si ces installations bénéficient de températures clémentes et d'un bon ensoleillement, conditions idéales trouvées dans la ceinture équatorienne.

Les micro-algues sont très diluées dans l'eau, elles sont donc concentrées après récolte, puis passées sous presse pour éclater les cellules et récupérer les molécules d'intérêt. L'extraction des lipides peut se faire au moyen de solvants organiques, ou à haute température et haute pression avec de l'eau sub-critique ou des fluides super-critiques [9]. Les lipides extraits des algues sont trop visqueux et donc incompatibles avec les moteurs actuels dans lesquels ils laissent des dépôts. Les huiles sont donc transformées par hydrogénation sous haute température et haute pression, ou hydrogénation catalytique (ne nécessitant pas de hautes températures). Elles peuvent également être transformées par transestérification catalytique qui, avec le méthanol, produit des EMAG.

Devenir des biocarburants

Pour que la production de biocarburant puisse se pérenniser, il faut qu'elle réponde à plusieurs critères [9]:

- un rapport positif entre l'énergie produite et l'énergie non renouvelable consommée. Ce rapport est de 2 à 3 pour la production d'EMHV de colza, alors qu'il n'atteint que 1,15 à 1,8 pour l'éthanol de blé ou de betterave;
- le meilleur bilan carbone possible (émission de gaz à effet de serre le plus bas possible) depuis le champ jusqu'au véhicule. Ce bilan est favorable au biocarburant, dont les émissions sont 3 à 5 fois moins importantes que celles des carburants fossiles;
- la concurrence la plus faible possible, entre l'usage alimentaire et industriel, des terres et de l'eau.

Tous ces critères semblent être réunis puisque l'on constate un fort développement de la filière des biocarburants en France: elle représentait 2,2% des énergies renouvelables en 2005 et atteignait 12% en 2013 [10]. Cette filière est en effet encouragée par l'Union européenne, qui s'est fixé pour objectif d'employer 10% de biocarburants dans les transports en 2020 (directive européenne 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation

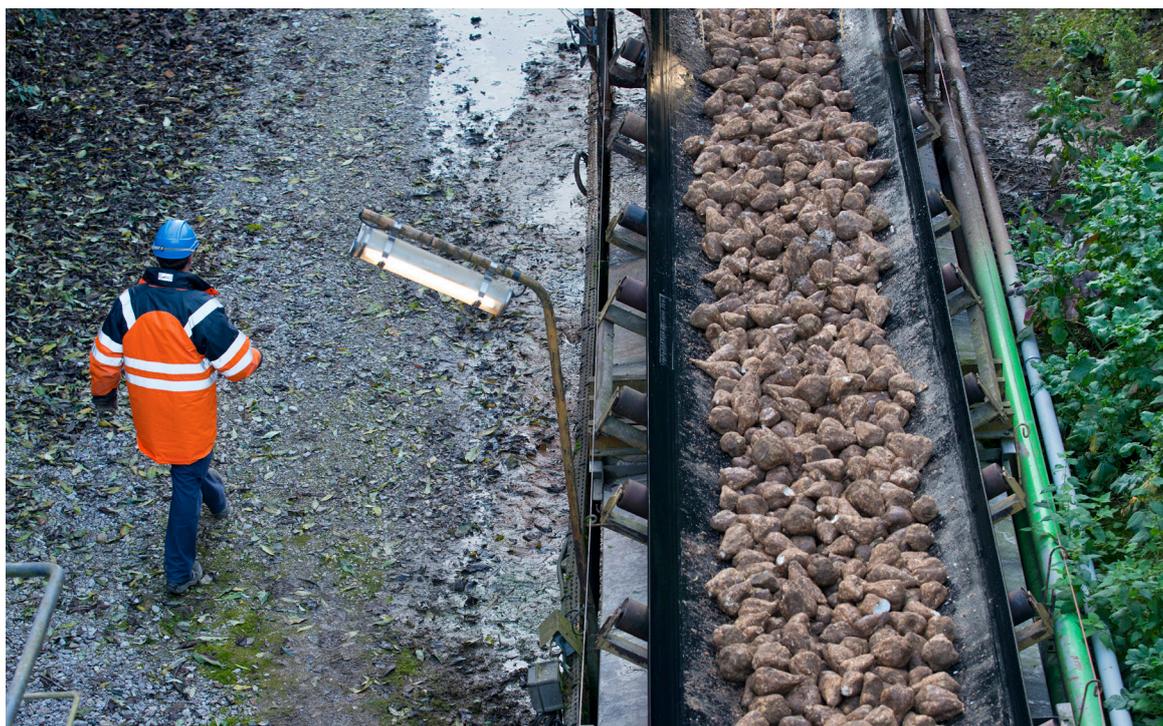


© Photo Alto

de l'énergie produite à partir de sources renouvelables). Toutefois, cet objectif est fortement discuté. En cause: le bilan CO₂ qui n'est pas aussi bon qu'espéré, l'utilisation des terres arables pour la culture de plantes destinées à la production de biocarburants plutôt qu'à la consommation humaine et les impacts indirects du changement d'affectation des sols (CASI). Le débat reste ouvert pour revoir cet objectif et préciser la part que doivent prendre les biocarburants de deuxième génération, plus écologiques. Cette directive de 2009 sur les énergies renouvelables impose d'ores et déjà que les biocarburants génèrent une baisse des GES par rapport aux carburants fossiles de 35% actuellement et d'au moins 50% en 2017 et 60% en 2018. Cette volonté de baisse des GES est confirmée dans la nouvelle stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable 2015-2020. L'Alliance nationale de la coordination de la recherche pour l'énergie (Ancre) a réalisé une étude prospective sur la transition énergétique française à l'horizon 2050. Tous les scénarios décrivent une baisse des importations de produits pétroliers, couplée à une augmentation des investissements pour le développement des énergies renouvelables (autour de 1000 milliards d'euros d'ici à 2050). Les différences entre scénarios sont subordonnées aux pressions politiques et sociales (investissements public et privé, incitations fiscales, taxation des GES...). Dans le scénario le plus optimiste, l'Ancre estime que la production de biocarburants de deuxième génération pourrait être multipliée par 2,5 en 2030. En 2050, les biocarburants (de 1^{re}, 2^e voire 3^e génération, ainsi que le biogaz) pourraient représenter 40% de l'énergie consommée dans les transports. Le scénario le plus défavorable n'envisage que 10% de biocarburant dans les transports (contre 7% actuellement).

Le colza, plante riche en huile, est employé pour produire du biodiesel notamment.





© Fabrice Dimier pour l'INRS

Le bioéthanol peut être produit à partir de betteraves à sucre.

Risques professionnels nouveaux ?

Les travaux de prospective de l'Ancre n'ont pu établir clairement l'impact de la transition énergétique sur les emplois directs et indirects. Toujours est-il que les entreprises, comme les raffineries historiquement chimiques, voient déjà une partie de leurs activités glisser vers les biotechnologies, avec l'introduction de micro-organismes dans les procédés. Ces nouveaux procédés ont des répercussions sur l'ensemble de la production : le stockage des matières premières, la conservation des souches de micro-organismes, l'utilisation de bioréacteurs, la manipulation de nouveaux produits, la gestion de nouveaux déchets... Tout ceci nécessite d'être étudié attentivement du point de vue de la prévention des risques professionnels qui sont de plusieurs types et qui diffèrent selon l'étape du procédé.

Stockage des matières premières

En amont, la matière première réceptionnée est très diversifiée : graines, bois, pulpe de betterave, bagasse de canne à sucre, miscanthus, huiles animales ou huiles de cuisson usagées... Les modes de stockage et de déplacement interne des matières doivent être adaptés à cette biomasse solide, liquide, parfois coupante. Au cours de ces étapes, les salariés encourent différents risques comme, par exemple, l'ensevelissement ou l'étouffement dans les silos, les glissades sur sols gras ou sur les pulpes de betterave, les coupures avec les herbacées telles que le miscanthus, les TMS, les risques liés à l'inhalation de poussières. À cela s'ajoutent des risques biologiques liés aux micro-organismes de l'environnement dégradant naturellement les

matières premières, si elles ne sont pas correctement stockées à l'abri de l'humidité dans un local ventilé. De plus, dans certaines conditions, la fermentation de la matière première peut générer des gaz inflammables ou dangereux pour la santé. Il convient de prévoir des réceptacles adaptés à la nature du produit (pour éviter que les pulpes roulent sur les voies de circulation, la dispersion des huiles en cas de fuite, la fermentation des huiles...) et des systèmes de convoyage capotés évitant l'empoussiérement des locaux. Une attention particulière doit être portée aux risques d'incendie et d'explosion liés aux biogaz et à la nature même des matières premières combustibles ou pulvérulentes. Cette vigilance doit être maintenue lors de toutes les étapes du procédé qui, somme toute, est destiné à produire des biocarburants inflammables.

Conservation des souches

Les entreprises ont également besoin de conserver les précieuses souches adaptées à leurs procédés. Les micro-organismes sont employés pour produire soit des enzymes, soit de l'alcool, soit de l'huile. Le stockage se fait en froid négatif, mais surtout sous azote liquide (-196°C) qui peut entraîner des risques d'anoxie dans un espace confiné. Le personnel ouvrant les conteneurs d'azote liquide est également exposé au froid et à d'éventuelles projections d'azote (brûlure cryogénique). Les locaux renfermant les conteneurs d'azote doivent être équipés de détecteur et de système d'alarme informant sur la qualité de l'air. Seul pourra pénétrer dans cette pièce le personnel dédié, correctement

formé et informé, muni d'équipements de protection individuelle adaptés (gants, visières, etc.).

Cultures d'organismes vivants

Les enzymes, produites par les micro-organismes, sont des molécules chimiques pouvant générer des risques pour le personnel (allergie, irritation...). Leur production nécessite la culture en masse des micro-organismes, dans des bioréacteurs, système clos, parfois sous pression, contenant un milieu de culture liquide (mélange de produits chimiques). Ces micro-organismes, pouvant être génétiquement modifiés, sont généralement non pathogènes. Toutefois, en cas d'incident, des expositions massives peuvent engendrer des risques biologiques pour les salariés. Des mesures de prévention doivent également être prises pour éviter les explosions qui pourraient se produire en cas de dysfonctionnement des appareils sous pression.

Les photobioréacteurs sont des systèmes clos à pression atmosphérique. Le personnel est exposé à la culture (eau et micro-algues) lors des opérations de mise en route, de prise d'échantillons et de vidange. Le danger éventuel des micro-algues, génétiquement modifiées ou non, reste à évaluer au cas par cas.

Les bioréacteurs flottant sur les plans d'eau génèrent des risques inhérents au travail sur l'eau (noyade, glissade), en plus des autres risques liés à la manutention et à la manipulation de micro-organismes. Le travail en lagunage peut engendrer des risques physiques liés à la manutention lors de la culture ou de la récolte des algues, des risques de glissade et de chute dans les bassins. Si ces derniers sont mal entretenus, il n'est pas exclu que des zones de fermentation se créent, générant alors des gaz dangereux, comme l' H_2S .

Les salariés doivent être formés à la manipulation d'êtres vivants qu'ils chercheront à multiplier ou, pour certains, à éliminer pour préserver le procédé. Le nettoyage, la désinfection et la stérilisation des installations nécessitent l'usage de produits chimiques, pouvant générer des risques pour le

personnel par contact ou par inhalation, mais également l'usage de vapeur d'eau, pouvant entraîner des brûlures par contact ou par projection.

Procédés physico-chimiques

Enfin, la production des biocarburants fait intervenir de nombreuses réactions chimiques, appartenant au domaine de compétences des raffineries, qui sont en mesure de maîtriser les risques inhérents. L'évaluation des dangers chimiques doit tenir compte des substances (solides, liquides ou gazeuses) introduites et produites en cours de procédé. Lors de la production, mais également lors des opérations d'entretien et de maintenance, les opérateurs peuvent être exposés aux produits chimiques (méthanol, éthanol, méthylate de sodium, huiles, esters, acides, hexane, glycol, CO , H_2 , N_2 ,...) et à des risques liés aux installations (haute pression, écrasement, chaleur, bruit...).

Conclusion

Les biocarburants contribuent à l'ambition politique de diminuer les gaz à effet de serre et de rendre notre économie plus indépendante des ressources non renouvelables. Les biocarburants de première génération sont sujets à débat concernant l'utilisation concurrentielle des terres arables. En revanche, les biocarburants de deuxième et de troisième génération devraient encore mieux répondre aux exigences de la politique de développement durable. Les différents scénarios de prospective montrent tous que les biocarburants vont s'établir, voire progresser, dans notre société. Les outils très variés de production industrielle vont suivre la même courbe ascendante. Ils peuvent générer des risques nouveaux pour les entreprises changeant d'activité, mais globalement connus et maîtrisables. ●

1. Il est possible d'introduire artificiellement dans un micro-organisme le gène d'une enzyme produite par un autre organisme, qui se cultive difficilement ou ne produit pas l'enzyme en quantité suffisante.

2. Molécules issues des algues.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Panorama énergies-climat. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. 2014.

[2] www.developpement-durable.gouv.fr/La-DGAC-s-associe-a-Air-France.html

[3] Les biocarburants passent la seconde. *Science et Avenir*, n° 812, 2014.

[4] Les biocarburants de 2^e génération. *Les défis du CEA*, n° 170, 2012.

[5] FONTAINE S. Enzymes, levures et bactéries à l'assaut de la biomasse. *Industries & Technologies*, n° 970, 2014.

[6] PASSEBON P. Bioraffineries: tout est bon dans le végétal. *Industries & Technologies*, n° 970, 2014.

[7] Un nouveau biocarburant à base d'algues. *La Recherche*, n° 462, 2012.

[8] ABERT VIAN M. ET AL. Techniques conventionnelles et innovantes, et solvants alternatifs pour l'extraction

des lipides de micro-organismes. *Oilseeds & fats Corps and Lipids*. 2013.

[9] L'engagement dans la biomasse vu par Total. *L'actualité chimique*. 2014. N° 381. p. 34-39.

[10] Rapport sur l'industrie des énergies décarbonées. Direction générale de l'énergie et du climat - Pétrole, gaz, énergies décarbonées. 2012.