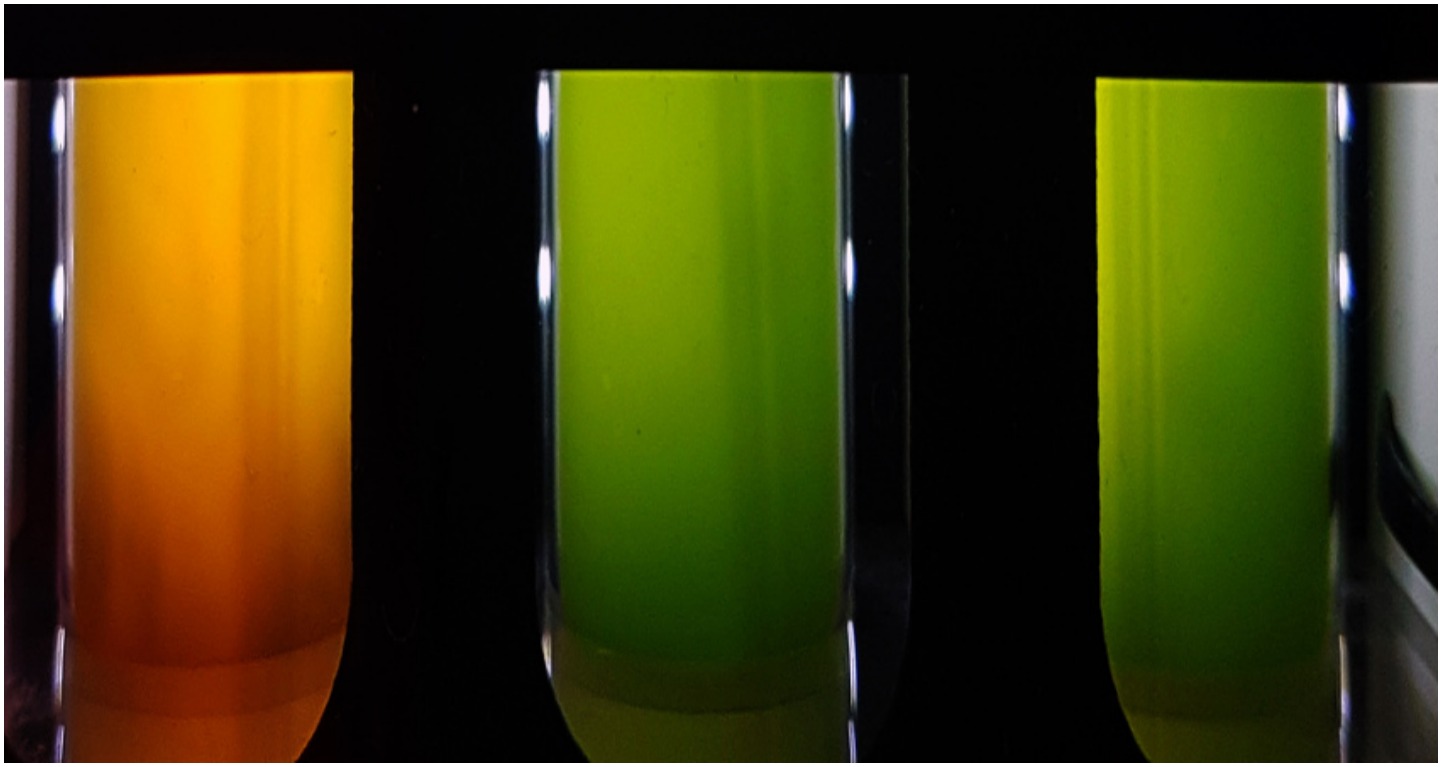
Biocarburants : l'avenir est-il aux microalgues ?

Auteur :
MARECHAL Eric, Directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de Physiologie cellulaire et végétale, Université Grenoble Alpes

15-01-2020



Arrivons nous à la fin des énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole) et saurons nous nous en passer ? Quelles alternatives envisageons nous ? Les sociétés humaines dépendent des hydrocarbures puisés dans les sols pour une multitude d'applications parfois méconnues. Il y a bien sûr le besoin en essence ou en kérosène pour nos véhicules sur les routes, les océans, dans les airs... S'il existe des solutions convaincantes pour faire rouler des voitures sans essence, il est souvent dit que la dernière goutte de pétrole servira à faire voler un avion. Les hydrocarbures fossiles sont aussi une source de composés pour la chimie - ou pétrochimie - dont sont issus les plastiques et toutes sortes de matériaux, mais aussi pour les goudrons qui couvrent nos routes, les mousses polyuréthanes et produits isolants pour nos constructions. Quel est l'état des recherches pour développer des biocarburants ? Comment anticipons nous ces nouvelles filières industrielles biosourcées ?

Figure 1. Exploitation des ressources fossiles. A : Charbon extrait des mines de Kayenta, Arizona, USA [Source : By Peabody Energy, Inc. (Provided by Peabody Energy) [CC BY 3.0], via Wikimedia Commons] ; B, Exploitation de sables bitumineux en Alberta, Canada [Source : By Howl Arts Collective (Flickr: tar sands, Alberta) [CC BY 2.0], via Wikimedia Commons] ; C, Plateformes de production de gaz et de pétrole en Mer d'Irlande [Source : By Ian Mantel [CC BY-SA 4.0], from Wikimedia Commons]

L'exploitation des gisements de **charbon**, de **pétrole** et de **gaz naturel** (Figure 1) a un coût environnemental qu'il n'est plus possible d'endurer. L'épuisement de ces ressources dites 'fossiles' est annoncé, mais il est encore lointain, d'au moins plusieurs décennies. Le charbon est devenu cher à extraire dans de nombreux pays, mais il reste des régions minières en exploitation. Le prix du pétrole, qui indexe aussi celui du gaz naturel, n'est pas encore dicté par la raréfaction ou la pénurie et il est encore loisible de baisser les cours pour des raisons géopolitiques. De nouveaux gisements d'hydrocarbures sont découverts, dans des régions peu explorées comme l'Arctique ou des zones off-shore au large des côtes. Il est possible, quoique coûteux, d'extraire du pétrole de gisements moins riches tels que les **sables bitumineux** (Figure 1B).

Certains hydrocarbures liquides, les **gaz de schistes**, etc., semblent être de nouvelles sources d'énergie fossile possibles, mais une fois encore l'environnement est très impacté par leur exploitation.

La recherche est donc très active pour identifier des alternatives, connues globalement sous le terme de « **biocarburants** ». [1] Pourquoi ? Ce texte propose un éclairage, en examinant tout d'abord ce que sont les hydrocarbures fossiles et leur origine et en évaluant les pistes actuelles envisagées pour des alternatives.

1. Qu'est-ce qu'un hydrocarbure fossile ?

Les composés organiques qui constituent **pétrole** et **gaz naturel** (**hydrocarbures = composés de carbone et d'hydrogène**) forment des mélanges complexes, qu'on qualifie de façon assez grossière par des teneurs en éléments (C, H, O, etc.) et par les longueurs moyennes des molécules présentes dans ces mélanges (Cn = nombre d'atomes de carbone) :

Les **chaînes carbonées les plus courtes** (méthane CH_4, éthane C_2H_6, propane C_3H_8 et butane C_4H_{10}) sont tous des **gaz**.

Les **chaînes plus longues**, allant jusqu'à $C_{18}H_{32}$, sont **liquides** et **les chaînes dépassant 19 carbones** sont **solides** à température ambiante.

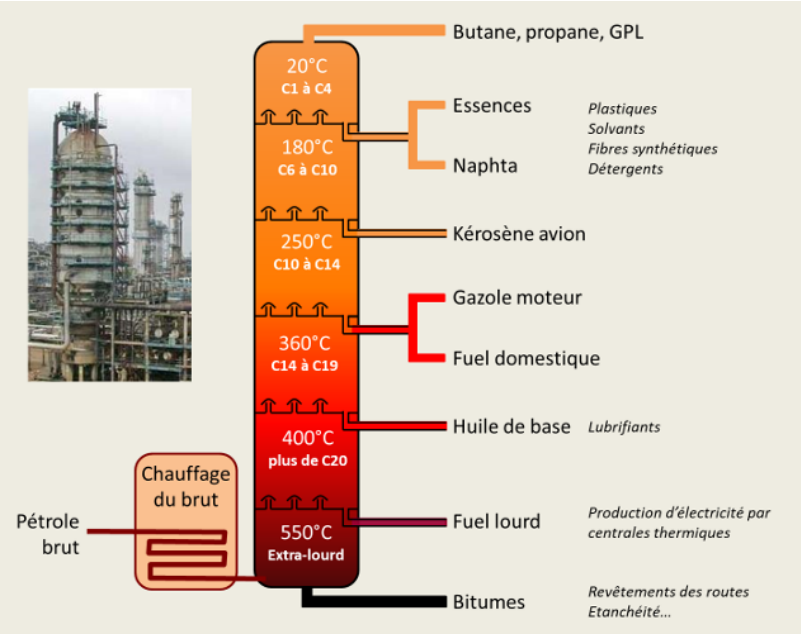


Figure 2. Représentation du fonctionnement d'une colonne de distillation du pétrole. Les molécules les plus volatiles (gaz butane, par exemple) sont récupérées à basse température en haut de la colonne ; les fractions les plus lourdes sont utilisées pour les bitumes ; elles sont récupérées à la base de la colonne. [Source : © Eric Maréchal ; Photo : [GFDL or CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons]

Ces molécules de longueurs différentes peuvent donc être séparées par un processus de distillation, à la base du raffinage du pétrole (Figure 2). La distillation est un procédé de séparation de mélange de substances liquides dont les températures d'ébullition sont différentes. Elle permet de séparer les constituants d'un mélange homogène. Les chaînes de longueurs inférieures à C8 sont facilement vaporisables, formant des liquides appelés naphte ou **naphta**, et utilisables pour des applications de solvatation (mise en solution de composés qui ne se dissolvent pas dans les milieux aqueux). Les chaînes jusqu'à C12 ont un point d'ébullition inférieur à celui de l'eau.

Les **hydrocarbures libèrent de l'énergie lorsqu'ils sont brûlés**, et ils sont donc utilisés comme « **carburants** » pour toutes

sortes de **moteurs**. La combustion est une réaction chimique exothermique ; c'est-à-dire qu'elle est accompagnée d'une production d'énergie sous forme de chaleur. La réaction chimique de combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant, une énergie d'activation en proportion suffisante. Des contraintes sont alors imposées par les types de moteurs sur l'hydrocarbure qu'il convient d'employer. [2]

Les **carburants automobiles** fonctionnent par exemple à des températures au-dessus de 100°C. Pour ces carburants un indice d'octane a été défini par la mesure de la résistance dans un moteur commandé par un auto-allumage, c'est-à-dire sans intervention de la bougie. Un **indice d'octane** *x* signifie que le carburant se comporte comme un mélange de *x*% d'octane (C_8H_{18}, résistant à l'auto-inflammation), et de (100-*x*)% d'heptane (C_7H_{16} qui s'auto-enflamme facilement). Suivant cette définition, l'indice d'octane d'une solution pure de C_8H_{18} est 100 et celui d'une solution pure de C_7H_{16} est de 0. Cet indice est optimisé pour les performances d'un moteur, et il ne reflète pas la quantité d'énergie contenue. En clair, un carburant est qualifié en fonction du moteur qui a été développé pour sa combustion.

Les **moteurs d'avions**, quant à eux, sont soumis à des conditions de pression et de température très différentes. Le « **kérosène** » est ainsi défini dans la portion C12-C15, suivi des « **diésels** » et carburants lourds (Figure 2). Ces derniers ne se vaporisent pas à température ambiante. Les chaînes de longueur supérieure à C20, solides, composent les « **paraffines** », les « **goudrons** » et les « **asphaltes** » (Figure 2). Il existe un indice d'octane pour des hydrocarbures non linéaires, contenant aussi des cycles aromatiques. Cet indice augmente dans l'ordre suivant : alcanes linéaires à chaîne longue < alcanes linéaires à chaîne courte < alcènes (contenant un oxygène) et cycloalcanes (naphtènes) < alcanes ramifiés et hydrocarbures aromatiques. Les propriétés recherchées pour les kérosènes sont leur pureté, leur point d'ébullition et faible risque d'explosion, leur faible point de congélation et leur indice d'octane élevé.

Le **charbon** se distingue du pétrole et du gaz car il représente une forme solide plus riche en carbone, suite à une transformation allant du lignite, à la houille puis à l'anthracite (trois types de roches sédimentaires que l'on trouve dans les mines, de plus en plus riches en carbone). Ce processus lent dépendant de la température, la pression et l'oxydoréduction s'appelle la carbonisation.

2. De la biomasse aux hydrocarbures fossiles

2.1. Les hydrocarbures fossiles sont d'origine essentiellement végétale

Figure 3. Fossile de plante dans un morceau de charbon datant du Carbonifère [Source : By James St. John [CC BY 2.0], via Wikimedia Commons]

Les hydrocarbures trouvés dans les roches poreuses et dans les charbons sont issus de dépôts de matière organique vivante, essentiellement végétale, depuis environ 400 millions d'années (Lire Pétrole : les preuves de son origine biologique). Après sédimentation, les débris végétaux accumulés à l'échelle géologique sont transformés progressivement par une exposition à des conditions de température, de pression, d'oxydation, etc., particulières aboutissant aux gisements exploités actuellement. Le Carbonifère (environ -360 à -300 millions d'années) est connu pour être un étage géologique riche en charbon, et le Jurassique (environ -200 à -145 millions d'années) et le Crétacé (environ -145 à -65 millions d'années) sont connus pour être des étages riches en champs pétrolifères… Tous ces hydrocarbures brûlés massivement chaque jour par les activités humaines correspondent donc à une biomasse lentement accumulée sur des centaines de millions d'années -il y a des centaines de millions d'années- grâce à la photosynthèse qui caractérise les végétaux.

2.2. La richesse énergétique de la biomasse végétale est issue de la photosynthèse

La matière vivante (la **biomasse**) est construite à partir d'une matière organique (des sucres, des lipides, des nucléotides, des aminoacides, etc.) qui dérive intégralement de molécules de **glucose** produite par la **photosynthèse**. Dans la **pyramide écologique**, la matière organique entre en effet par ce sucre produit par les végétaux, qualifiés alors de « **producteurs primaires** » (Lire Qu'est-ce que la biodiversité ?).

Deux phases caractérisent la photosynthèse (« **photo-** » pour la première phase qui se déroule à la lumière et « **-synthèse** » pour la seconde phase qui se déroule ensuite), et permettent à l'énergie solaire d'être capturée et accumulée en matière organique.

Dans la **première phase**, l'**énergie lumineuse solaire** est captée, puis par un processus qui « casse » au passage une molécule d'eau en libérant du dioxygène (O_2), cette énergie est convertie en **deux types de molécules riches en énergie**, l'**ATP** (adénosine triphosphate), qui est la plus connue, et le **NADPH** (nicotinamide adénine dinucléotide phosphate) qui porte ce que l'on appelle un « pouvoir réducteur ».

Dans la **seconde phase** de la photosynthèse, grâce à cet ATP et à ce NADPH, le **CO_2 de l'atmosphère est capturé et réduit** (grâce au pouvoir réducteur du NADPH) en triose-phosphate (un ose phophorylé à 3 atomes de carbone), précurseur du **glucose**, un sucre de composition élémentaire globale **$C_6H_{12}O_6$**.

Le « **métabolisme** » comprend toutes les réactions chimiques qui, à partir de ce glucose, permettent de synthétiser toutes les molécules du vivant. **Toute la matière organique, toute la biomasse ainsi produite est riche en carbone et en énergie.**

Lorsqu'un organisme se nourrit de biomasse, il se nourrit certes de matière mais aussi de cette énergie solaire, dont il a besoin pour toutes ses fonctions biologiques. En « cassant » la matière par un processus cellulaire appelé « **respiration** », processus qui nécessite de l'O_2, les cellules **récupèrent une part de cette énergie emmagasinée pour la recycler à nouveau en ATP et en pouvoir réducteur**. Ce faisant, la respiration libère naturellement du CO_2.

Au **bilan**, la **photosynthèse capture l'énergie solaire et l'intègre au CO_2 en synthétisant du glucose** $C_6H_{12}0_6$, et **la respiration peut récupérer une part de cette énergie en libérant du CO_2**. Le processus d'oxydation du $C_6H_{12}0_6$ en présence d'O_2 libérant du CO_2 est comparable à la combustion qui libère l'énergie sous forme de chaleur. On dit parfois que la respiration « brûle » les sucres.

2.3. La combustion des hydrocarbures fossiles, source massive de CO_2 : un petit calcul…

En considérant qu'un arbre capture du CO_2 par la photosynthèse et en perd une partie par la respiration, on peut estimer de façon très grossière qu'il faut 2 kg de CO_2 atmosphérique pour produire 1 kg de biomasse végétale sèche. En considérant que le CO_2 représente entre 300 et 400 ppm (parties par millions) de l'atmosphère, on peut estimer qu'il faut de l'ordre de 3,5 tonnes d'air pour produire 1 kg de biomasse. Avec une masse volumique entre 1,1 et 1,2 kg/m^3, il faut donc le CO_2 présent dans un volume d'air représenté par un cube de 15 m de côté pour produire 1 kg de biomasse.

Figure 4. Chêne remarquable. Il faut 2 kg de CO_2 atmosphérique pour produire 1 kg de la biomasse de cet arbre, mais la combustion d'un kg de son bois sec, libère du CO_2 atteignant la teneur naturelle contenue dans plus de 3000 m^3 d'air ! Le poids sec de ce chêne doit être d'environ 20 tonnes, sa combustion libèrera la même quantité de CO_2 que celle qui est contenue dans environ 60 millions de m^3 d'air ! [Source : Larry D. Moore [CC BY-SA 3.0 or GFDL], via Wikimedia Commons]

Le résultat de ce simple calcul est parmi les plus merveilleux pour qualifier la singularité et l'importance du monde végétal dans la biosphère. Toute la matière vivante est issue de cette performance hors-norme des cellules végétales qui capturent un gaz extrêmement mineur, le CO_2, pour en faire un solide qui s'accumule dans les sédiments. Le revers de cet émerveillement est que lorsque nous brûlons 1 kg de bois, nous libérons du CO_2 atteignant la teneur naturelle contenue dans plus de 3000 m^3 (Lire La biosphère, un acteur géologique majeur) (Figure 4).

S'il s'agit de brûler du bois collecté récemment, le CO_2 émis compense celui capturé peu de temps auparavant par la photosynthèse, et on peut considérer que ce bilan est neutre. Mais lorsque nous brûlons des hydrocarbures fossiles, nous émettons dans l'atmosphère du CO_2 atmosphérique qui avait été lentement piégé pendant des centaines de millions d'années. L'atmosphère se trouve enrichie en CO_2 du Carbonifère, du Jurassique, du Crétacé, ce qui s'ajoute à toutes les autres sources industrielles de CO_2 et contribue très largement au changement climatique.

3. Développer les biocarburants : quelles bio-ressources, quelles bio-molécules ?

Outre les émissions massives de CO_2, l'usage des hydrocarbures fossiles produit divers types de pollutions : des effluents toxiques et des résidus gazeux produits au cours du raffinage, des métaux lourds, des oxydes de carbone, des oxydes d'azote, des suies et des particules fines, etc. (Lire Les pollutions de l'air). Concernant les dérivés du pétrole, la pollution par les matières plastiques imputrescibles est la plus visible (Lire La pollution plastique en mer : le septième continent) alors que de petites molécules sont aussi libérées dans l'environnement, sous forme de perturbateurs endocriniens qui agissent sur tous les organismes vivants. Les émissions de molécules polluantes et de gaz à effet de serre doivent naturellement être évaluées pour les biocarburants. En clair, même si nous recherchons activement des solutions alternatives aux hydrocarbures fossiles, les biocarburants ne solutionnent peut-être pas toutes les questions posées.

Pourrions-nous nous passer des hydrocarbures et en particulier du pétrole ? Même s'il est possible de faire voler un avion poids-plume à l'aide d'énergie solaire, il est inenvisageable à ce jour de transporter des dizaines, et *a fortiori* des centaines de passagers sans kérosène. Trouver des alternatives nécessite aussi de développer des solutions à tous les dérivés du pétrole, et en particulier la pétrochimie. Le développement d'une chimie respectueuse du développement durable, qui veille à l'équilibre environnemental du milieu dans lequel elle s'insère, s'appelle la chimie verte, chimie durable ou chimie renouvelable. Ces alternatives de la pétrochimie ne sont cependant pas garante d'un faible impact sur l'environnement, et un enjeu majeur qui s'applique aussi à la chimie verte est que celle-ci respecte les normes environnementales. On ne peut donc parler de « **biocarburant** » sans parler de « **chimie verte** ».

3.1. Les bio-ressources

Les **plantes cultivées**?

Figure 5. Exemple de cultures produisant des sucres (canne à sucre, à gauche) ou des lipides (colza, à droite) pouvant servir à la production de biocarburants. [Source : A gauche, By Phil (Flickr: Sugar Cane 2) [CC BY 2.0], via Wikimedia Commons ; A droite, Photo: Myrabella / Wikimedia Commons]

Il a été initialement envisagé de simplement convertir une partie de l'agriculture pour ce besoin en biocarburants [3]. **Deux grands types de composés biochimiques sont envisagés pour cette application : les sucres et les lipides** (voir plus loin)**.** La production agricole de pays comme le **Brésil** a été orientée dans cette direction, produisant de la **canne à sucre** pour les biocarburants (Figure 5).

Figure 6. Plantes oléagineuses utilisables pour la production de biocarburants. A, Jatropha curca : A1, plante avec ses fruits [Sources : A1, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic License ; A2, By Frank Vincentz [GFDL or CC-BY-SA-3.0], viaWikimedia Commons; A3, flacon de biodiesel fabriqué à partir des graines de Jatropha (Biswarup Ganguly [GFDL, CC BY 3.0], via Wikimedia Commons) ; B, Palmier à huile : B1, plantation en Malaisie (By Craig [Public domain], from Wikimedia Commons) ; B2, fruits du palmier à huile (By oneVillage Initiative (Jukwa Village & Palm Oil Production, Ghana) [CC BY-SA 2.0], via Wikimedia Commons). C, Crambe abyssinica (By Kurt Stüber [1] [GFDL or CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons). De ces trois plantes, seule la culture de Crambe abyssinica pourrait être endurable pour l'environnement.

Des **espèces oléagineuses** alimentaires telles que le **colza** (Figure 5B), le **palmier à huile** (Figure 6B) ou des espèces moins connues comme la **caméline** ou le **jatropha** (Figure 6A) ont été évaluées en allant jusqu'à faire des essais en complément de carburants automobiles ou de kérosènes pour l'aviation. Toutefois, le besoin pour l'alimentation animale et humaine ne permet pas un tel modèle de développement. Le coût environnemental en termes d'espaces naturels détruits, d'engrais, de pesticides, etc., n'est pas endurable [4]. Par exemple, il est aujourd'hui établi qu'**il ne sera pas possible d'envisager une production agricole dédiée aux biocarburants en concurrence avec l'agriculture pour l'alimentation.**

Un premier compromis a été proposé en exploitant des plantes poussant dans des zones non-cultivées, par exemple *Crambe abyssinica*, une plante proche de la moutarde, peu gourmande en eau ou en engrais (Figure 6C). Une seconde piste très développée vise à exploiter les résidus agricoles (allant des pailles ou chaumes, aux déchets de bois, déjections animales, résidus de récoltes, etc.). Ces **résidus agricoles** peuvent être du tout-venant et être traités avec des déchets, afin d'en extraire l'énergie par un processus de **gazéification** (voir plus loin).

Les **microalgues** et les **microorganismes** ?

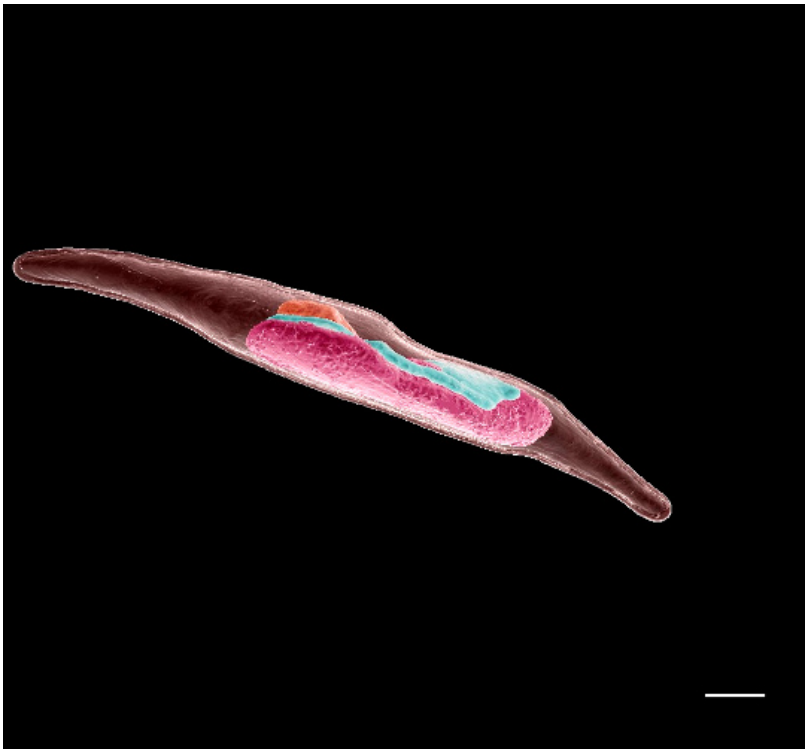


Figure 7. Reconstruction tridimensionnelle d'une diatomée, Phaeodactylum tricornutum. [Source : © Denis Falconet, LPCV, Photothèque CNRS]

N'entrant pas en compétition avec les surfaces agricoles dédiées à l'alimentation, les microalgues, essentiellement **oléagineuses**, sont évaluées par de nombreux laboratoires de recherches et de nombreux acteurs industriels. La biodiversité des microalgues est sans équivalent, allant d'organismes unicellulaires issus d'endosymbioses dites « simples » (**algues vertes**, **algues rouges**) à des organismes issus de l'assemblage complexe de plusieurs cellules éloignées dans l'évolution (Lire Symbiose et évolution : à l'origine de la cellule eucaryote), suivant un processus d'endosymbioses « multiples » (par exemple les **diatomées,** Figure 7). Citons parmi les espèces considérées actuellement ***Chlorella*** et ***Scenedesmus*** (algues vertes), ***Nannochloropsis*** (endosymbionte secondaire).

Figure 8. Bassin ouvert utilisé pour la culture de microalgues. L'eau est constamment maintenue en mouvement grâce une roue à palettes motorisée. [Source : By JanB46 [CC BY-SA 3.0], via Wikimedia Commons]

Pour arriver à une industrie viable, il faut aussi développer tout l'équivalent de l'agriculture : l'algoculture. Il faut ainsi évaluer les systèmes de culture en plein air (bassins ouverts ou « open ponds », Figure 8) [5],[6] soumis aux aléas climatiques, aux contaminations, etc., ou bien les systèmes clos (photobioréacteurs ou « PBR ») [7],[8]. **Cultiver des microalgues est une**

question de gestion de l'eau, à envisager donc dans les schémas de traitement des eaux usées**. Cultiver des microalgues est aussi une question de gestion des intrants phosphatés et azotés**, comme pour l'agriculture. Il s'agit aussi d'apporter le CO_2, par exemple d'industries émettrices telles que l'industrie du ciment. Il faut aussi **collecter et extraire les molécules riches en énergies**.

3.2. Les bio-molécules

Les **sucres** ont été considérés initialement, du fait de leur fermentation en éthanol (bio-éthanol) par des levures. Les sucres les plus simples, ou fermentescibles, de la canne à sucre ou de la betterave ont donc été exploités (Figure 9). Le bioéthanol ainsi produit peut être mélangé aux hydrocarbures fossiles mais dans une teneur faible, car les moteurs sont abimés par ce biocarburant. Le bioéthanol a contribué à encourager le développement de l'ensemble des biocarburants car il en illustrait concrètement la faisabilité, puisque des voitures circulent chaque jour avec une part d'agro-éthanol (supercarburant sans plomb à 10% d'éthanol SP95-E10) [9].

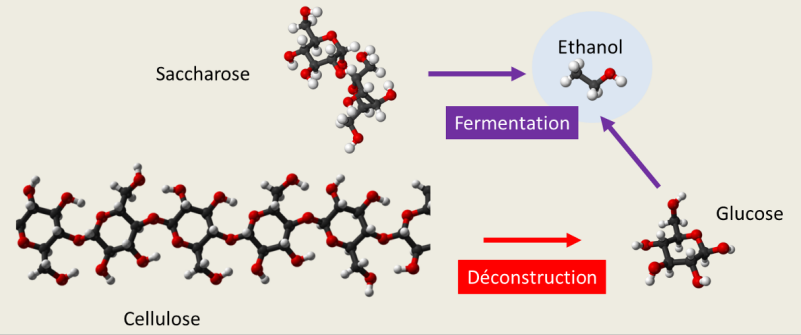


Figure 9. Représentation tridimensionnelle de composés à base de sucres pouvant servir à la fabrication de biocarburants : la fermentation alcoolique du saccharose (produit par la canne à sucre ou la betterave) ou du glucose permet la production d'éthanol ou bioéthanol. Boules noires : atomes de carbone ; boules rouges : atomes d'oxygène ; boules blanches : atomes d'hydrogène. [Source : © Eric Maréchal]

Comme indiqué plus haut, les agro-ressources ne sont plus envisagées comme viables [10]. D'autres sucres sont activement recherchés : par exemple ceux qui sont polymérisés dans les parties rigides non consommées des plantes, la **cellulose**. Ces sucres sont assemblés entre eux, sous forme de polymères, qu'il faut défaire pour libérer les sucres simples. Pour cette discipline récente de la biochimie, on parle de 'déconstruction'. Ces polymères de sucres sont associés à des molécules qu'il est très difficile de déconstruire : la **lignine**. On parle de **filière lignocellulosique** comme une piste nouvelle, pour aller vers le bioéthanol [11]. Les microalgues quant à elles sont envisagées pour des molécules plus riches en énergie et avec un potentiel plus grand en chimie verte : les lipides.

Les **lipides** constituent la classe de biomolécules la plus prometteuse, sur laquelle les efforts sont les plus importants à ce jour. On parle de plantes ou de microalgues **oléagineuses**. Il s'agit en fait de **glycérolipides**, des molécules riches en longues chaînes de carbones appelées acides gras. Les longueurs variables des acides gras rappellent les longueurs variables des hydrocarbures fossiles décrits plus haut (en 1). Les acides gras initialement produits chez les plantes et les algues oléagineuses ont des longueurs allant de 14 à 18 carbones (C14 à C18), avec quelques traces de C12, mais ils peuvent aussi atteindre des longueurs de C20 à C24 et plus. Les lipides contenant 3 acides gras sont appelés **triacylglycérols**, et forment ce qu'on appelle l'**huile**.

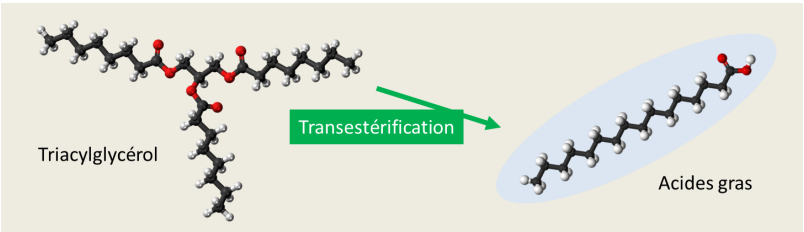


Figure 10. Les triacylglycérols présents dans les algues ou les graines oléagineuses libèrent des acides gras par transestérification. Ces acides gras (en fait des esters méthyliques d'acides gras) forment un biocarburant proche du pétrole. Boules noires : atomes de carbone ; boules rouges : atomes d'oxygène ; boules blanches : atomes d'hydrogène.[Source : © Eric Maréchal]

Par une réaction chimique de **trans-estérification**, il est possible de libérer ces acides gras, formant un bio-carburant proche du pétrole (Figure 10) [12]. Comme pour les hydrocarbures liquides, des propriétés particulières de l'huile sont recherchées pour les moteurs, en particulier d'avion. De façon schématique, l'**huile de palme** est solide à température ambiante et devient fluide et liquide à haute température, ce qui est recherché pour un **bio-kérosène**. Des recherches visent donc à optimiser ce type de propriétés dans l'huile, en recherchant des acides gras courts et avec le moins de doubles liaisons possibles. Toutefois, une telle huile n'est pas toujours bien tolérée par la plante ou la microalgue oléagineuse, et la biomasse obtenue n'est pas suffisante. **Un des enjeux majeurs de ce domaine est donc d'identifier un système biologique produisant en masse une huile capable d'être utilisée comme alternative au pétrole.**

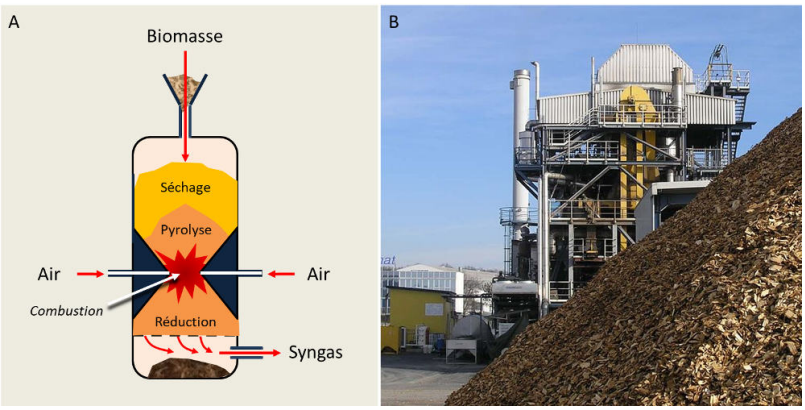


Figure 11. A. Représentation schématique d'un dispositif de production de syngas par pyrolyse à partir de la biomasse. B. Usine de gazéification de la biomasse de Güssing, Autriche. [Source : © Eric Maréchal ; photo de droite : Creative Commons Attribution 2.5 Generic]

La **biomasse brute**, enfin, est aussi considérée. Dans des filières de traitements avec les déchets, plusieurs types de conversion sont envisagés, par voie biochimique, chimique ou thermochimique. Il s'agit d'un champ entier de développements technologiques souvent séparés des biocarburants, mais qu'il est bon de rappeler ici. Un procédé actuellement développé consiste à convertir la biomasse sèche en gaz, appelé « **syngas**», par exemple par pyrolyse et/ou gazéification (Figure 11) [13]. Le syngas est de composition variable suivant la biomasse utilisée et le procédé d'obtention. Considéré comme de moindre qualité, il était connu au début du XXe siècle sous le terme de gaz manufacturé ou gaz de ville. Ici encore le mélange de biomasse avec du charbon fossile est aussi envisagé dans des processus de co-combustion.

Il n'existe pas aujourd'hui de solution unique et idéale. Dans tous les cas, il est nécessaire de comprendre comment la brique agronomique ou biotechnologique développée s'intègre dans un schéma général plus grand, lui aussi à construire. On parle alors de filières.

4. Les filières énergétiques de demain couplées aux filières agronomiques, biotechnologiques et à la chimie verte

Les recherches réalisées aujourd'hui concernent les **bioressources** (avec un effort important sur les microalgues), les **méthodes de cultures**, les **procédés de récoltes** et d'**extraction** et enfin la **conversion** des biomolécules extraites en **biocarburant** prêt à l'emploi [14].

Concernant les bioressources, la question de l'évolution dirigée ou de la production d'organismes génétiquement modifiés se pose. Concernant les méthodes de cultures, le **couplage avec les systèmes de gestion de l'eau** et avec les **industries émettrices de carbone** est étudié [15]. L'**impact sur l'environnement**, l'utilisation des intrants (phosphate, azote), le **bilan énergétique** global et la **durabilité** sont évalués dans ce qu'on appelle les **analyses de cycles de vie**.

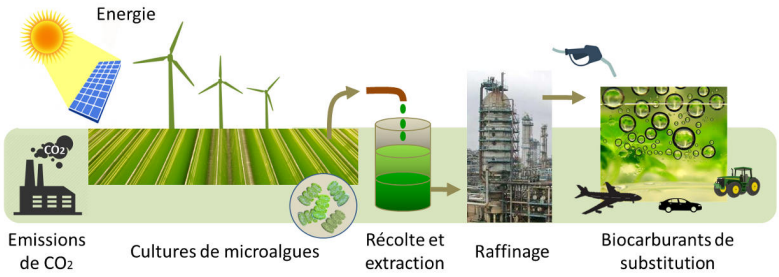


Figure 12. Processus de production de biocarburants à partir de biomasse provenant de microalgues. [Source : © Eric Maréchal]

Comme toute **énergie renouvelable**, la production de biocarburant a un rendement faible. **Il présente cependant l'avantage de pouvoir mettre en réserve l'énergie, sous forme de biomasse**, ce qui peut être intégré dans les mix énergétiques **couplé avec les technologies de production d'énergie non stockable**. Ainsi, les **éoliennes** produisent de l'électricité lorsqu'il y a du vent ou les **cellules photovoltaïques** quand il y a du soleil, électricité qu'on ne sait pas bien stocker. Il est envisageable que cette électricité soit utilisée pour éclairer des parcs de culture de microalgues, pour un stockage certes à faible rendement, mais tout de même un stockage sous forme de biomasse. Aujourd'hui ce type de couplage est envisagé avec un traitement des microalgues par **liquéfaction hydrothermale** [16].

La biomasse peut aussi être sujette à un **raffinage** [17], séparant les biomolécules pour les biocarburants (par exemple les huiles), des pigments pour des applications cosmétique ou biomédicales, ou des protéines pour la production animale. Aujourd'hui les systèmes d'extraction sont destructifs, mais ce modèle est considéré comme un moyen de réduire les coûts de production.

En conclusion, les biocarburants ne sont pas encore mûrs pour soutenir un système économique viable [18]. Les recherches visent à augmenter qualités, rendements, procédés, dans le sens de la viabilité économique. Vu le coût environnemental des hydrocarbures fossiles, les biocarburants ne sont pas une option, mais une nécessité, pour laquelle il faudra trouver les meilleures solutions et les meilleurs compromis. A ce propos, le développement des biocarburants à base d'algues est un des aspects de la mise en place de solutions algo-sourcées pour l'agroalimentaire, la nutrition animale, les cosmétiques, la biomédecine et la chimie verte [19].

5. Messages à retenir

L'exploitation des gisements de charbon, de pétrole et de gaz naturel a un coût environnemental qu'il n'est plus possible d'endurer.

Les biocarburants font l'objet de recherches très actives comme alternatives possibles aux énergies fossiles, mais ils ne sont pas mûrs pour soutenir un système économique viable.

Les ressources utilisées pour produire les biocarburants sont de deux types : les plantes cultivées (betterave, colza, canne à sucre, palmier à huile, par exemple) et les microorganismes et plus particulièrement les microalgues.

Il n'est pas possible d'envisager une production agricole dédiée aux biocarburants en concurrence avec l'agriculture pour l'alimentation.

Deux grands types de composés biochimiques sont envisagés pour la production de biocarburants : les sucres (pour la production d'éthanol) et les lipides (pour la production d'ester méthyliques d'acides gras).

La biomasse brute peut aussi être utilisée pour produire du syngas, par exemple par pyrolyse et/ou gazéification.

Les recherches réalisées pour le développement des biocarburants concernent les bioressources (avec un effort important sur les microalgues), les méthodes de cultures, les procédés de récoltes et d'extraction et enfin la conversion des biomolécules extraites en biocarburant prêt à l'emploi.

Ces filières doivent être conçues pour limiter l'impact sur l'environnement, avec une évaluation du bilan énergétique global et de la durabilité.

Le développement des biocarburants à base d'algues est un des aspects de la mise en place de solutions algo-sourcées pour l'agroalimentaire, la nutrition animale, les cosmétiques, la biomédecine et la chimie verte.

Références et notes

Image de couverture. Cultures de microalgues en photobioréacteur (*Phaeodactylum*, en brun et *Nannochloropis*, en vert). [Source : © Photo LPCV (CEA/CNRS/UGA/INRA)]

[1] Les biocarburants sont des carburants issus de la transformation des matières végétales (plantes, algues, etc.). Lorsque ces dernières sont produites par l'agriculture (betterave, colza, canne à sucre, tournesol, palmier à huile…), on parle aussi d'agrocarburants. Les biocarburants sont assimilés à une source d'énergie renouvelable. La Directive 2003/30/CE du parlement européen et du conseil du 8 mai 2003 visant à promouvoir l'utilisation de biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports définit les biocarburants comme « *un combustible liquide ou gazeux utilisé pour le transport et produit à partir de la biomasse* ». La biomasse étant « *la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et de ses industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux* », Journal officiel n° L 123 du 17/05/2003 p. 0042 – 0046.

[2] Ces contraintes sont aussi importantes pour les biocarburants.

[3] La production des biocarburants de type agrocarburants n'est pas sans impact environnemental, parfois majeur. Les objectifs de production fixés par l'Europe ont d'ailleurs été revus à la baisse, avec l'obligation de certification de la production et application de critères de durabilité. Si la production des agrocarburants s'inscrit dans une trajectoire de développement durable, elle n'est intrinsèquement durable que sous certaines conditions de production.

[4] de Cara S., Goussebaile A., Grateau R., Levert F., Quemener J., Vermont B. (2012) *Revue critique des études évaluant l'effet des changements d'affectation des sols sur les bilans environnementaux des biocarburants* Etude réalisée par l'INRA pour l'Ademe ;
http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/effet-changements-affectation-sols-sur-bilans-environnementaux-biocarburant

[5] Rogers J.N., Rosenberg J.N., Guzman B.J., Oh V.H., Mimbela L.E., Ghassemi A., Betenbaugh M.J., Oyler G.A. & Donohue M.D.A (2014) *Critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales.* Algal Research 4:76-88.

[6] Beal C.M., Gerber L.N., Sills D.L., Huntley M.E., Machesky S.C., Walsh M.J., Tester J.W., Archibald I., Granados J. & Greene C.H. (2015) *Algal biofuel production for fuels and feed in a 100-ha facility: A comprehensive techno-economic analysis and life cycle assessment.* Algal Research 10:266-279.

[7] Slade R. & Bauen A. (2013) *Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects.* Biomass and Bioenergy, 53:29-38. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.019

[8] Stephenson A.L., Kazamia E., Dennis J.S., Howe C.J., Scott S.A. & Smith A.G. (2010) *Life-cycle assessment of potential algal biodiesel production in the United Kingdom: a comparison of raceways and air-lift tubular bioreactors.* Energ. Fuel, 24:4062-4077.

[9] En septembre 2017, les volumes de SP95-E10 ont représenté 38,5 % de l'essence vendue en France.

[10] La Commission européenne veut d'ailleurs réduire l'ajout de bioéthanol issu de céréales ou de betteraves dans l'essence vendue en Europe. La France reste le premier producteur européen de bioéthanol, avec 12 millions d'hectolitres produits chaque année. Quelque 300.000 hectares, soit 1 % de la surface agricole utile, fournissent à la fois énergie et alimentation.

[11] Didderen I., Destain J. & Thonart P. (2009) *Le bioéthanol de seconde génération : La production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique.* Presses Agronomiques Gembloux. 128 pp.

[12] Les huiles végétales ne peuvent pas être utilisées telles quelles (même en mélange dans le gazole) pour l'alimentation des moteurs Diesel modernes. C'est pourquoi elles sont « estérifiées », c'est-à-dire transformées en esters d'acides gras, par la réaction chimique de trans-estérification. Ces esters méthyliques d'acides gras peuvent être obtenus à partir : (a) d'huiles végétales extraites de plantes oléagineuses : on parle alors d'EMHV (ester méthylique d'huile végétale), (b) de graisses animales : on parle alors d'EMHA (ester méthylique d'huile animale) et (c) d'huiles végétales alimentaires usagées et récupérées par un

circuit de collecte identifié : on parle alors d'EMHU (ester méthylique d'huile usagée).

[13] Ce procédé ne doit pas être confondu avec la **méthanisation** appliquée en particulier aux déchets organiques. Elle permet la production de méthane (ou **biogaz**), par transformation anaérobie de la biomasse à l'aide de microorganismes.

[14] Delrue F., Li-Beisson Y., Setier P.-A., Sahut C., Roubaud A., Froment A.-K. & Peltier G. (2013) *Comparison of various microalgae liquid biofuel production pathways based on energetic, economic and environmental criteria*. Biores. Technol. 136:205-212.

[15] Ces perspectives font l'objet de recherches un peu partout dans le monde et en particulier au sein de divers projets européens (INDALG, IPHYC-H2020, ALGEN, ALGAECAN, ALGAEBIOGAS, etc…).

[16] López Barreiro D., Prins W., Ronsse F & Brilman W. (2012) *Hydrothermal liquefaction (HTL) of microalgae for biofuel production: State of the art review and future prospects.* Biomass Bioenerg. 53 :113-127

[17] 't Lam G.P., Vermuë M.H., Eppink M.H.M., Wijffels R.H. & van den Berg C. (2018) *Multi-Product Microalgae Biorefineries: From Concept Towards Reality.* Trends Biotechnol. 36:216-227. doi: 10.1016/j.tibtech.2017.10.011. Epub 2017 Nov 10.

[18] Bhujade R., Chidambaram M., Kumar A. & Sapre A. (2017) *Algae to economically viable low-carbon-footprint oil.* Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng. 8:335-357.

[19] Koller, M., Muhr, A., Braunegg, G. (2014) *Microalgae as versatile cellular factories for valued products.* Algal Research 6:52-63.

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** MARECHAL Eric (2020), Biocarburants : l'avenir est-il aux microalgues ?, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=5555

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.