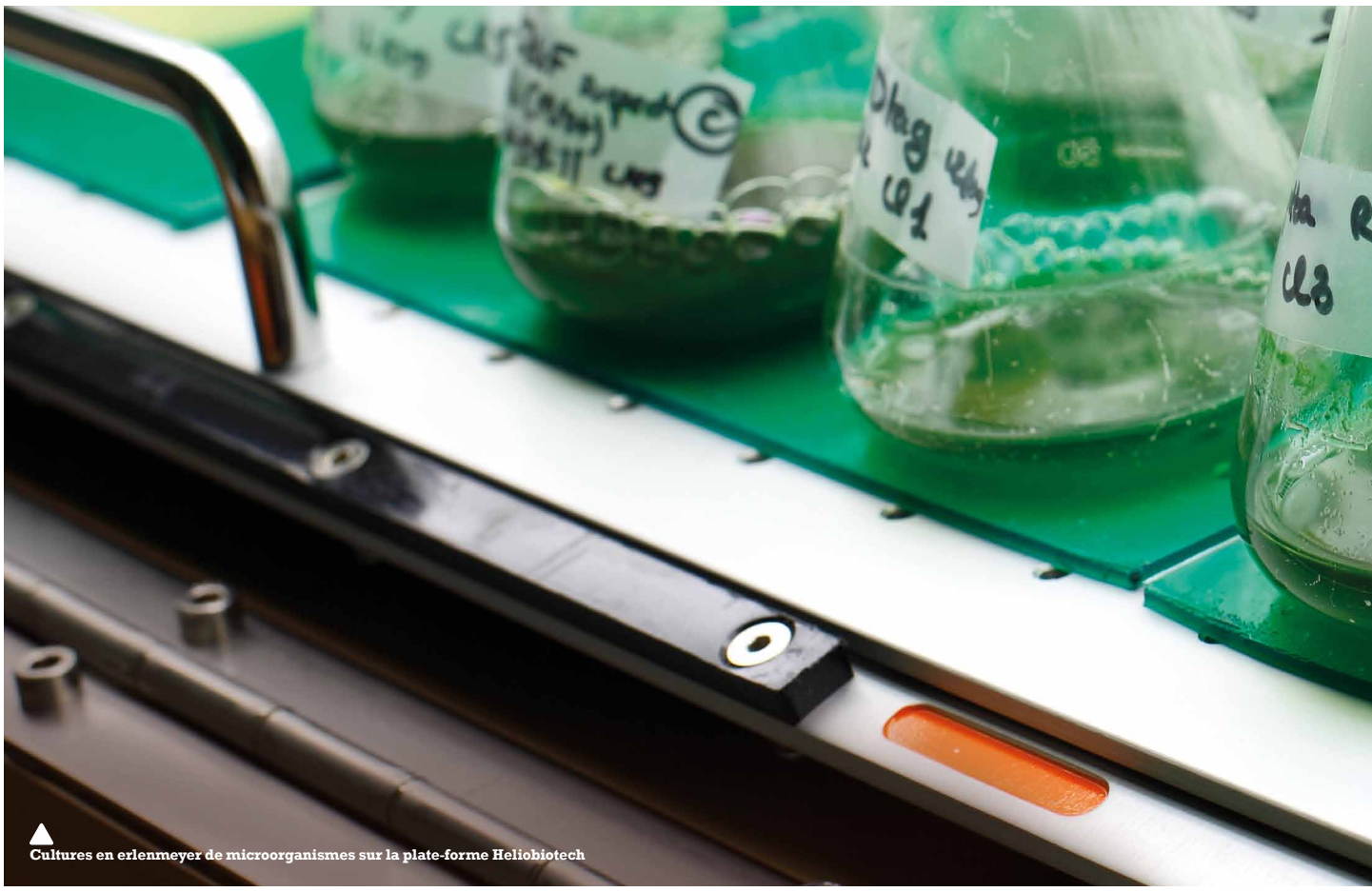


LES MOTEURS PASSENT AU VERT



Cultures en erlenmeyer de microorganismes sur la plate-forme Heliobiotech



© G.Lesénéchal/CEA



À eux seuls, les transports représentent un quart de la consommation d'énergie et un quart des émissions de gaz à effet de serre en France. Pour réduire cet impact, le CEA explore deux pistes : l'électrification des véhicules et le développement des biocarburants. Si la 1re génération est en place, son bilan mitigé invite les chercheurs à mettre au point la 2e, avec les résidus forestiers comme principale ressource. Des projets de démonstrateurs pré-industriels voient le jour quand, déjà, d'autres recherches anticipent la 3e génération de biocarburants *via* le potentiel des micro-algues à synthétiser des composés qui trouveront leur place dans les moteurs. *Dossier réalisé par Stéphanie Delage*



DE LA BIOMASSE ET DES ALGUES DANS LE MOTEUR

CAP SUR LA 2e GÉNÉRATION

ALGOCARBURANTS : LA MER POUR MODÈLE

DE LA BIOMASSE ET DES ALGUES DANS LE MOTEUR

Les carburants de demain feront appel à la lignocellulose des végétaux et aux micro-algues. Ils permettront de s'affranchir en partie des hydrocarbures, de réduire les émissions carbonées et pourront fortement contribuer à alléger notre dépendance énergétique.



Analyse des traces d'impuretés organiques et inorganiques dans des échantillons de biomasse lignocellulosique.

En France, près d'un quart de la consommation en énergie concerne les transports. Cette dépendance aux hydrocarbures coûte de plus en plus cher avec une facture qui a triplé depuis 2005, dépassant les 60 milliards d'euros en 2011. Car, si les réserves en hydrocarbures de la planète sont encore loin d'être taries, il faut aller les chercher plus loin, forer plus profond, avec des technologies de plus en plus coûteuses. À cela s'ajoutent la vulnérabilité des marchés aux troubles géopolitiques et l'impact des fluctuations de la parité euro/dollar qui ne jouent pas toujours en faveur des Européens, le pétrole s'achetant en dollars. Le coût est aussi d'ordre environnemental avec, en France, près d'un quart des émissions de gaz à effet de serre (GES) imputables au secteur des transports. Or, l'État s'est engagé à réduire de 20 % ces émissions d'ici 2020[1]. Repenser les transports dans l'Hexagone constitue donc une priorité stratégique à laquelle le CEA contribue, notamment avec une R&D sur les 2e et 3e générations de biocarburants.

Une 1re génération de biocarburants controversée

« Les transports de demain feront appel aux véhicules électriques et aux biocarburants de façon complémentaire », explique Patrick Georgette, conseiller technique auprès de l'administrateur général du CEA. Comme 87 % des Français effectuent des trajets de moins de 60 km/j, l'autonomie, même limitée, des véhicules électriques peut répondre à ces besoins. Mais pour des trajets de longue distance ainsi que pour les transports routiers, maritimes et aériens, les biocarburants se révèlent être une véritable alternative. À tel point que l'Union européenne ambitionne de produire 2 millions de tonnes de biocarburants par an, à partir de 2020[2], pour le secteur aéronautique. La légitimité des biocarburants de 1re génération fait cependant débat. Très coûteux, en compétition avec l'agriculture vivrière, pas si « verts » qu'on le croyait au départ, ils n'apparaissent

LES BIOCARBURANTS EN CHIFFRES

86

milliards de litres d'éthanol ont été produits en 2010 dans le monde (principalement par les États-Unis et le Brésil), ce qui le place en tête des biocarburants, devant le biodiesel (19 milliards de litres), dont la production est essentiellement européenne.

4e

La France se situe au 4e rang mondial des producteurs de biodiesel, avec 2 milliards de litres en 2010.

7 %

C'est l'objectif français de taux d'incorporation à la pompe du biodiesel. Ce taux n'a atteint que 6,3 % en 2010, ce qui reste toutefois supérieur à l'objectif européen de 5,75 %.

Plus d'informations sur www.cea.fr

plus comme la panacée pour remplacer les carburants fossiles. Selon l'Organisation des Nations Unies, ils participent même à la flambée des prix des denrées alimentaires sur le marché mondial.
La France utilise un peu moins de 6 % de sa surface agricole pour les biocarburants, soit 1,7 million d'hectares. La production est principalement axée sur le biodiesel, obtenu par **transestérification**• à partir de l'huile extraite du colza et du tournesol. Quant au bioéthanol, produit par la fermentation de sucres, il résulte de ceux de la betterave ou de l'hydrolyse **enzymatique**• de l'amidon du blé et du maïs. Selon un rapport de l'Ademe[3], le biodiesel permet de réduire de 59 à 90 % les émissions de GES, (éthanol de 49 à 72 %) par rapport aux carburants fossiles. Toutefois, dans un avis publié en avril, l'agence convient que la prise en compte du changement d'affectation des sols pour des cultures dédiées aux biocarburants de 1re génération limite ces gains.

De nouvelles alternatives avec les résidus forestiers et les algues

L'urgence est donc de déployer les nouvelles générations en prenant en compte les retours d'expérience de la première. *« On aurait tort de penser que la 2e génération des biocarburants est dans la lignée de la 1re,* souligne Patrick Georgette. *Elle constitue en effet une véritable rupture technologique. »* Parce qu'elle utilise la lignocellulose de la plante, elle n'entre pas en concurrence directe avec les cultures vivrières. Tous les déchets verts (branchages ou résidus forestiers) peuvent être utilisés, en évitant les conflits d'usage avec les professionnels du bois. *« Les propriétés physiques de ce type de biocarburant peuvent lui permettre de se substituer au carburant fossile alors que la 1re génération ne peut être utilisée qu'en additif, avec une proportion ne dépassant pas 10 % »*, explique l'expert. Le CEA-Liten prend part à l'amélioration des différentes étapes du procédé de production tandis qu'un démonstrateur pré-industriel verra bientôt le jour à Bure-Saudron (voir en page 19).
La 2e génération pourrait entrer sur le marché vers 2015-2016 et la 3e est déjà en marche. *« Là encore, il ne s'agit pas d'un simple progrès mais d'une nouvelle façon de penser les biocarburants,* affirme Patrick Georgette. *L'idée est de cultiver des micro-algues et de transformer leurs huiles en carburants synthétiques. »* Les instituts iBEB, iRTSV et iBITEC-S planchent pour explorer les micro-organismes les plus avantageux et les améliorer par génie génétique (voir en page 20). *« Une piste prometteuse mais dont il faudra apporter la preuve de la rentabilité économique quand elle arrivera à maturité, vers 2020-2025. Quel sera alors le prix du pétrole ? »*

• **Transestérification :** réaction chimique de l'huile sur un alcool pour obtenir du biodiesel.

• **Hydrolyse enzymatique :** transformation de l'amidon en sucres par des enzymes.


© G.Lesnéchal/CEA

Cultures de micro-organismes sous air enrichi en CO_2.

Notes :
1. *Par rapport aux niveaux de 1990.*
2. *Initiative Biofuel Flight Pass.*
3. *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.*

AU CEA

CEA-iRTSV L'Institut de recherches en technologies et sciences pour le vivant s'appuie sur un ensemble de plateaux technologiques modernes pour analyser la diversité et la complexité du vivant. À ces fins, il coordonne les programmes d'unités mixtes CEA/ Université Joseph Fourier/ CNRS/ INSERM et INRA.

CEA-Liten Le laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles se positionne sur quatre axes : énergie solaire, développement d'une filière hydrogène pour les transports, production d'hydrogène et innovations technologiques sur les matériaux et les procédés.

CEA-iBEB Comprendre les mécanismes d'adaptation aux stress environnementaux, polluants métalliques et rayonnements ionisants est l'un des objectifs de l'Institut de biologie environnementale et biotechnologie. Ses recherches portent aussi sur la production de molécules à forte valeur ajoutée.

CEA-iBiTec-S La palette de recherche (fondamentale ou appliquée) de l'Institut de biologie et de technologies de Saclay est large : génétique, biologie moléculaire et cellulaire, biologie structurale, ingénierie des protéines, chimie organique et inorganique… Sa mission : fédérer l'ensemble de ces compétences.

CAP SUR LA 2e GÉNÉRATION

Fabriquer du carburant à partir des déchets verts ou des résidus forestiers : une alternative intéressante aux « agrocarburants ». Tour d'horizon des principaux projets auxquels participe le CEA pour façonner ces biocarburants de 2e génération.

Le pétrole, qui provient de la décomposition de la matière organique coincée entre deux couches sédimentaires, a eu besoin de millions d'années pour se former. Aujourd'hui, les scientifiques sont capables d'accélérer le temps en produisant du carburant à partir de matière organique, la biomasse. Une succession de réactions chimiques permet en effet de reconfigurer l'assemblage de ses atomes de carbone et d'hydrogène. L'idée n'est pas nouvelle, du moins elle se calque sur une méthode mise au point au milieu du XXe siècle par les Allemands, pauvres en pétrole mais riches en charbon. Avec un procédé de **gazéification**• du charbon et une réaction catalytique dénommée **Fischer-Tropsch**•, ils obtinrent un carburant synthétique. « *Nous repartons en partie de cette idée pour produire des biocarburants de 2e génération à partir de la biomasse,* raconte Nicolas Bardi, responsable du DTBH[1] au CEA-Liten. *Toutefois, le bois ou la paille n'ont pas grand-chose à voir avec le charbon. Moins denses, ils se caractérisent par des taux d'humidité et des taux d'impuretés importants.* »

• **Gazéification :** transformation d'un combustible finement pulvérisé (charbon, biomasse) en monoxyde de carbone (CO) et hydrogène (H_2).

• **Fischer-Tropsch :** procédé qui catalyse le monoxyde de carbone (CO) et l'hydrogène (H_2) en hydrocarbures (C_nH_{2n+2}).

Genepi, plate-forme R&D d'excellence

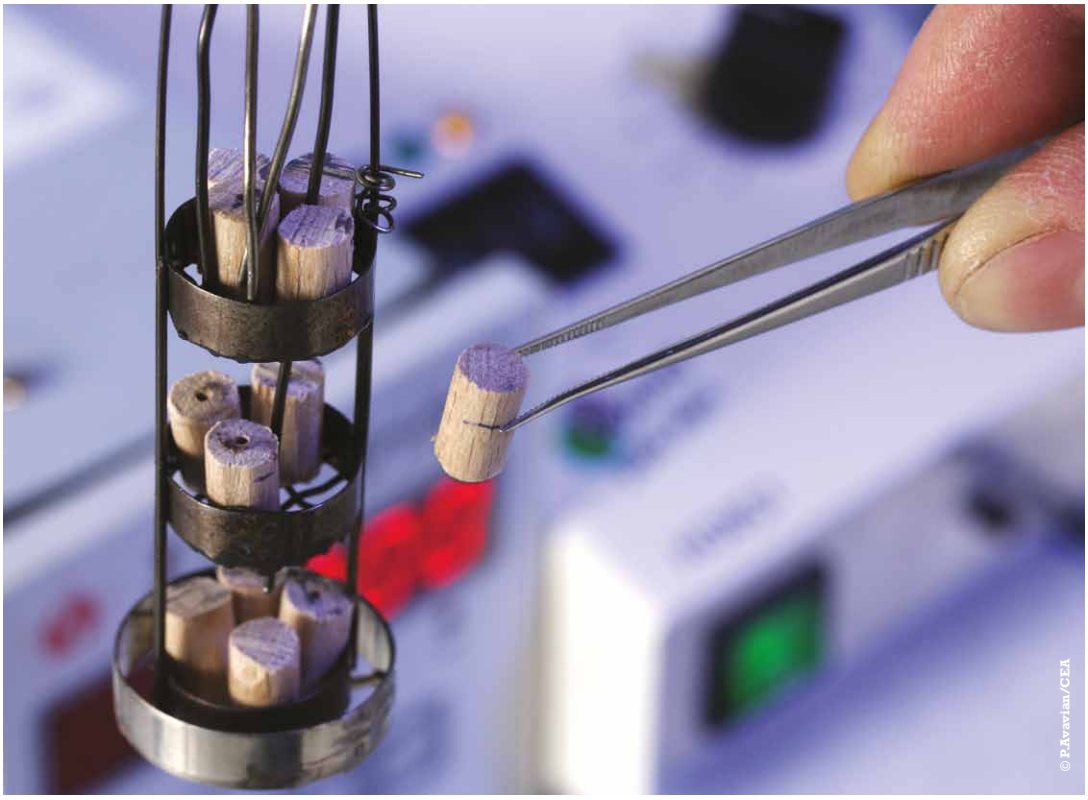
« *La connaissance des phénomènes physiques et chimiques liés à la décomposition de la biomasse est une étape clé pour lever les verrous de la 2e génération,* souligne le scientifique. *Il est également essentiel d'ajuster les procédés afin de réduire les coûts et de travailler sur des pilotes de taille modeste avant de se lancer à l'aveugle dans des projets de grande envergure.* » Le CEA a obtenu fin 2011 la labellisation Equipex du ministère de la Recherche pour le projet Genepi, une plate-forme expérimentale visant à optimiser différentes étapes de la fabrication de biocarburant. Les chercheurs testeront à partir de 2013 la pertinence de leurs brevets sur des équipements de torréfaction (la 1re étape qui vise à éliminer l'eau et à casser les fibres de la biomasse), de broyage (pour réduire la biomasse en poudre) et de gazéification. Ils pourront par exemple ajuster les paramètres de température lors de la torréfaction, repérer quel type de biomasse répond le mieux à l'étape de broyage ou bien ajuster le flux des poudres lors de la gazéification. « *Le réacteur à lit entraîné a été choisi pour la*


© P.Avavian/CEA

Échantillons de biomasse lignocellulosique.


© CEA

Maquette du projet de démonstrateur pré-industriel Syndièse.



Étude de la torréfaction de particules de bois.

gazéification, explique Nicolas Bardi. *La poudre est injectée sous pression dans un jet d'oxygène. Cette technique a été éprouvée pour le charbon mais nous devons l'optimiser pour la biomasse. »*

Syndièse, vers un démonstrateur pré-industriel

Le CEA s'investit également dans des programmes proches des conditions industrielles. C'est le cas de Syndièse, projet de démonstrateur pré-industriel pour produire des biocarburants à partir de déchets forestiers de la Meuse et de la Haute-Marne, qu'il conduit dans le cadre d'une action d'accompagnement économique de ces territoires. *« La France est le 2e pays forestier d'Europe en terme de superficie. Le choix des résidus forestiers comme matière première pour les biocarburants prend donc tout son sens,* raconte Thierry Puissieux, chef du programme Valorisation au CEA-Den. *Syndièse sera alimenté par des plaquettes forestières collectées dans un rayon de 50 km autour du démonstrateur, prévu à Bure-Saudron. »* Objectif : valider à l'échelle pré-industrielle une chaîne de production de 10 tonnes/heure sur un site unique pour fabriquer 30 millions de litres par an de biodiesel à partir de 75 000 tonnes de biomasse sèche. L'innovation réside également dans l'ajout d'hydrogène au mélange gazeux issu de la gazéification de la biomasse : une première mondiale pour mobiliser tout le carbone de la biomasse et doubler le rendement de production.

« L'idée consiste à produire de l'hydrogène par **électrolyse de l'eau**•*, en périodes creuses*[2] *afin de réduire les coûts,* explique Patrick Georgette, conseiller technique auprès de l'administrateur général du CEA. *L'hydrogène est alors stocké et utilisable à la demande. Cette innovation a un fort impact sur le modèle économique de l'ensemble des procédés ».* La première étape du projet consistera à réaliser un pilote de gazéification afin de valider les briques technologiques. Le CEA instruit cette possibilité qui sera proposée en fin d'année au Gouvernement.

Les briques technologiques de BioTFuel

Autre projet digne d'intérêt, BioTfuel, né d'une collaboration avec Axens, l'Ifpen, Sofiproteol, ThyssenKrupp Uhde et Total. Il vise le développement de briques technologiques pour obtenir, à terme, une chaîne complète de procédés pour produire du biodiesel et du biokérosène de 2e génération à l'horizon 2020. La capacité de ces installations sera de 3 t/h environ, réparties sur deux sites : Sofiprotéol accueillera le pilote de pré-traitement de la biomasse à Venette dans l'Oise et Total hébergera à Dunkerque le pilote pour les autres étapes. *« L'étape de gazéification se fera dans un réacteur à lit entraîné à très haute température (1 500 °C),* précise Nicolas Bardi. *Ensuite, le gaz sera transformé en biodiesel ou en biokérosène en faisant varier les conditions de catalyse du procédé Fischer-Tropsch ».*

• **Électrolyse de l'eau :** décomposition de l'eau (H_2O) en oxygène (O_2) et hydrogène (H_2).

Notes :

1. *Département des technologies pour la biomasse et l'hydrogène.*

2. *Les industriels peuvent effacer leur consommation électrique en période de pointe et bénéficier en retour d'une tarification préférentielle sur leur facture d'électricité.*

GAYA, LA PISTE DU BIOMÉTHANE

Le pilote Gaya coordonné par GDF Suez, intéresse également le CEA. De taille modeste (moins d'1 t/h), il permettra de tester une nouvelle technologie de production de biométhane, un biocarburant qui pourra être utilisé dans les véhicules à gaz. *« Les procédés de fabrication ressemblent à ceux utilisés pour les biocarburants liquides,* explique le chercheur. *Mais la biomasse n'a pas ici besoin d'être réduite en poudre très fine. Elle sera gazéifiée dans un réacteur à lit fluidisé de 800 °C. »* Retour d'expérience en 2017 à Lyon.

ALGOCARBURANTS : LA MER POUR MODÈLE

Utiliser l'ingéniosité des micro-organismes marins pour faire rouler nos voitures : l'idée est étonnante, mais prometteuse. Les instituts iBEB, iRTSV et iBITEC-S du CEA multiplient les axes de recherche afin d'évaluer le potentiel des micro-algues• **à synthétiser huiles, sucres et hydrogène pouvant servir à la 3e génération de biocarburants.**

• **Micro-algues :** algues microscopiques et bactéries photosynthétiques (cyanobactéries).

• **Diatomées :** algues unicellulaires avec une coque en silice.

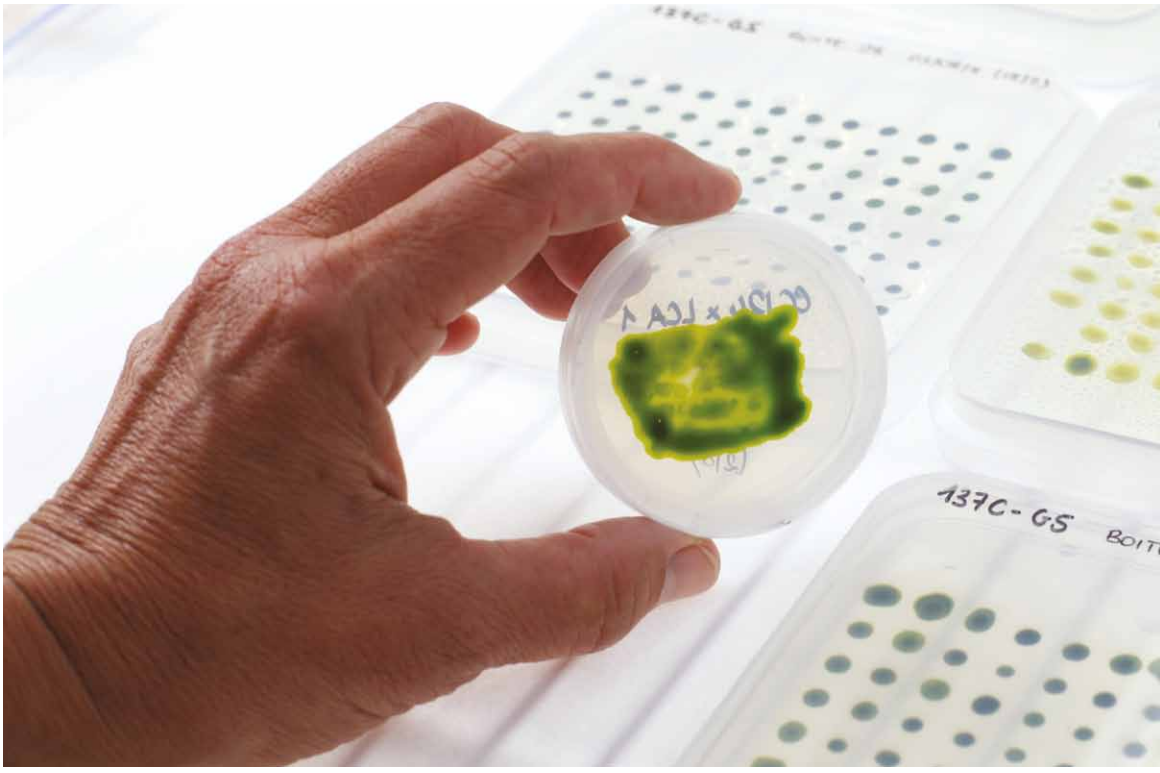
• **Photosynthèse :** fabrication de matière organique grâce à l'énergie lumineuse. Les molécules d'eau et de dioxyde de carbone sont transformées en glucose et en oxygène

Nombreux sont les avantages de cette biomasse marine. Tout d'abord, la culture des micro-algues ne mobilise pas de surfaces agricoles ou forestières comme le font les 1re et 2e générations de biocarburants. Ensuite, elle présente une productivité élevée. Enfin, ces micro-organismes ne requièrent que de la lumière et du CO_2 pour pousser, voire de l'azote ou d'autres additifs peu coûteux. La production d'algocarburants peut ainsi absorber une partie des rejets industriels carbonés et être couplée au recyclage des eaux usées.

Pour choisir les micro-algues dignes d'intérêt, encore faut-il bien les connaître ! Or, la mer est loin d'avoir révélé tous ses secrets. C'est là tout l'intérêt de l'expédition Tara Océans, à laquelle participe le CEA, qui doit dresser le plus grand inventaire du plancton jamais réalisé (voir p. 6 et 7). *« Pour l'heure, nous passons au crible les souches déjà disponibles et recensons celles qui produisent de l'huile de qualité avec un bon rendement pour fabriquer du biodiesel ou du biokérosène,* raconte Yonghua Li-Besson, chercheuse à l'iBEB. *Une autre approche consiste à travailler sur des modèles connus et à repérer des mutations génétiques intéressantes qui favorisent la production d'huile. »*

Les micro-algues privées de régime

De son côté, Éric Maréchal, biologiste à l'iRSTV, cherche à maîtriser et à renforcer les mécanismes d'accumulation de l'huile des **diatomées**• : *« Nous voulons les rendre obèses »* explique-t-il. Comment, alors que les micro-algues n'ont pas vocation à fabriquer de l'huile en grande quantité, leur premier objectif étant celui de se multiplier ? *« En situation de stress, par exemple en carence d'azote, la diatomée cesse de proliférer et emmagasine de l'huile,* souligne Éric Maréchal. *Mais nous souhaitons soutenir à la fois la pousse et la production d'huile, afin d'augmenter le rendement global. »* Les chercheurs utilisent pour cela la chimie, en cherchant à contrôler la production d'huile avec des molécules organiques, comme le ferait un médicament. Giovanni Finazzi, également de l'iRSTV, explore une autre voie pour favoriser la croissance des algues : *« Nous faisons varier les apports nutritifs. Les algues poussent grâce à la* **photosynthèse**• *ou en utilisant du carbone comme le font les animaux. Si nous créons un environnement propice à ces deux voies de métabolisation, la production peut être largement augmentée. »* Sur plusieurs souches d'algues, différents substrats carbonés



Cultures de micro-organismes sur gélose.

et différentes expositions lumineuses sont testées afin de trouver la meilleure combinaison possible. « *Les sources en carbone seront peu coûteuses,* estime Giovanni Finazzi. *En effet, on pourra utiliser les produits issus de la purification des eaux usées ou bien le glycérol, un sous-produit industriel.* »

Le génie génétique à la rescousse

Autre approche développée au CEA pour les biocarburants de 3e génération, celle du génie génétique. Il s'agit non pas d'utiliser l'huile des micro-algues pour fabriquer du biodiesel mais de les forcer habilement à produire de l'éthanol. Franck Chauvat, chercheur à l'iBITEC-S, travaille sur des cyanobactéries, des bactéries que l'on retrouve partout sur la planète, dans les mers et les déserts. Ces micro-organismes, très peu gourmands en énergie, ont la particularité de fixer le carbone par photosynthèse pour fabriquer des sucres. « *Notre objectif est de contraindre les cyanobactéries à transformer ces sucres en éthanol par fermentation, comme le fait la levure,* raconte le scientifique. *Pour cela, nous avons reprogrammé leur génome en introduisant les deux gènes qui leur manquent.* » Si les chercheurs ont réussi leur pari, le rendement reste faible.

La route des biocarburants de 3e génération est encore longue… Et au-delà de l'augmentation de productivité des souches, le défi consistera à améliorer les technologies de production à grande échelle et les procédés de récolte. « *Il faudra faire sauter de nombreux verrous pour aller vers un modèle économique viable,* confie Gilles Peltier, de l'iBEB. *Il est très difficile de se projeter dans le futur et malgré les progrès de la science, il faudra certainement attendre que le prix du pétrole augmente encore, qu'il double peut-être, avant que la 3e génération devienne rentable.* »



© G.Lesénéchal/CEA

HELIOBIOTECH, UNE PLATE-FORME QUI BIOCARBURE !

Constituer un pôle d'excellence sur les recherches biotechnologiques pour le développement des biocarburants de 3e génération, telle est l'ambition de la plate-forme HelioBiotec1 mise en service en 2011 sur le centre CEA de Cadarache.

Actuellement, 25 chercheurs y explorent le potentiel des micro-algues, optimisent les souches et mettent au point des outils pour les domestiquer ; d'ici 2017, ils seront rejoints par 25 autres scientifiques. « *Cette plate-forme est unique en France,* indique Gilles Peltier, de l'iBEB. *Elle sera adossée à un programme encore plus ambitieux qui va débuter à Cadarache dans le cadre de la Cité des Énergies. L'objectif sera d'associer la recherche amont et la recherche sur les procédés afin de proposer une offre globale sur toute la chaîne de valeur.* » Ce projet verra notamment la création d'une autre plate-forme commune associant les compétences des équipes du CEA-iBEB et du CEA-Liten. Soutenue par des partenaires académiques (CNRS, universités) ou industriels (Fermentalg, GDF Suez, etc.), HelioBiotec fait également partie de Green Stars, institut d'excellence en matière d'énergies décarbonées (IEED).


© G.Lesénéchal/CEA

Cultures de micro-organismes en photobioréacteur.


© G.Lesénéchal/CEA

Cultures de Chlamydomonas reinhardtii, vues au microscope optique, sur la plate-forme Heliobiotech.