

# Des **carbohydrates** aux **hydrocarbures**

*Ancien élève de l'École Normale Supérieure section biologie, Marc Delcourt s'est orienté vers des activités de recherche et développement dans le domaine des bioprocédés. En 1997, il a créé une première société dans le domaine de la biologie industrielle, Biométhodes, qu'il a quittée en 2008 pour fonder Global Bioenergies<sup>1</sup>. C'est l'activité de cette entreprise qu'il nous présente dans ce chapitre.*

## **1 Les biocarburants pour remplacer le pétrole de manière durable ?**

### **1.1. Remplacer le pétrole traditionnel ?**

Global Bioenergies est une société démarrée en 2008 par Marc Delcourt et Philippe Marlière. Scientifique visionnaire dans ce domaine, Philippe Marlière avait l'idée qu'on pourrait enseigner aux bactéries comment produire des hydrocarbures, c'est-à-dire de l'essence, du kérosène, ainsi que des plastiques et des produits pour la chimie fine, dans le domaine de la cosmétique en particulier.

De nombreux domaines utilisent les hydrocarbures dérivés du pétrole. Notre idée était de les produire directement, de faire d'une certaine façon un court-circuit du cycle géochimique : le pétrole, ce

sont des végétaux (en fait des micro-algues) qui mettent des millions d'années à devenir du pétrole dans des conditions physico-chimiques particulières. L'idée est de faire la même chose : prendre des végétaux et les transformer en pétrole non plus en millions d'années mais en heures, c'est-à-dire à l'échelle industrielle.

C'est un vieux rêve de l'humanité puisqu'on en parlait déjà dans l'Antiquité, comme on le voit dans *L'Odyssée d'Astérix* : le druide Panoramix est très inquiet parce qu'il lui manque un élément pour la potion magique sans laquelle le village ne pourra plus résister aux Romains, et cet ingrédient est le pétrole – *petra oleum*. Il envoie Astérix chercher du pétrole au Moyen-Orient mais celui-ci revient bredouille. Tout se termine bien finalement : Panoramix a trouvé une autre façon de faire : il remplace le pétrole par du jus de betterave !

1. [www.global-bioenergies.com/](http://www.global-bioenergies.com/)

Dans les grandes lignes, nous reproduisons cette vision : Global Bioenergies développe un procédé de conversion des sucres, le saccharose de betterave en particulier, en hydrocarbures. La technologie fonctionne déjà bien en laboratoire, et la mise à l'échelle est en route : un pilote, puis un démonstrateur industriel ont été construits et fonctionnent aujourd'hui en routine. Un projet de première usine de pleine taille, pour produire de la vraie essence à partir de mélasse de betteraves, est à l'étude.

Notre métier consiste à réaliser des innovations de rupture pour convertir les ressources renouvelables en carburant et en matériaux dits « drop in » par les américains, c'est-à-dire identiques aux produits aujourd'hui dérivés du pétrole : on peut les remplacer ou les mélanger sans limite de proportion. Aujourd'hui il n'y a pas vraiment de « drop in » dans les carburants.

Dans l'essence, on peut mettre de l'éthanol, qui est un très bon carburant, mais a l'inconvénient d'être corrosif, de capter de l'eau et de s'évaporer. Seuls des moteurs adaptés, dits « flexfuel », peuvent accepter des concentrations supérieures d'éthanol. Dans les moteurs des voitures à essence standard, cette limite de 10 % a été fixée dans tous les États de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques).

Comment faire pour aller au-delà ? On fabrique de la « vraie essence » et donc on amène le onzième pourcent, le douzième pourcent et le treizième pourcent, etc., de biocarburant dans l'essence

en amenant une molécule qui est vraiment la même que l'essence qu'on extrait du pétrole. Les composés produits par Global Bioenergies font en fait partie des meilleurs composés utilisables par les moteurs à essence : ils ont un indice d'octane très élevé, et produisent beaucoup moins de particules que l'essence fossile.

## 1.2. Une urgence économique et environnementale

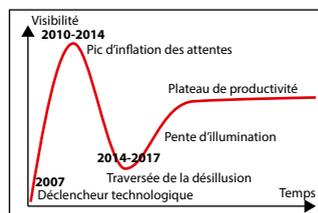
Le domaine des biocarburants et des biomatériaux a connu des temps difficiles. Quand Global Bioenergies a été fondée en 2008, le pic pétrolier était à nos portes. On était censé l'atteindre dans les quelques semaines, les quelques mois. Puis finalement, le pic pétrolier n'est pas survenu ; le pétrole de schiste aux États-Unis a noyé le monde dans du pétrole, d'une façon inattendue et presque miraculeuse, offrant un sursis de quelques années. Aujourd'hui, de nouveau, la tension sur le marché du pétrole augmente, et des scénarios catastrophe refont surface. Des mouvements prônent la préparation active à des situations de crise qui adviendront forcément lorsque la demande mondiale de pétrole se fera plus importante que l'offre.

Quand le prix du pétrole est tombé, en 2014, tout le domaine a été très secoué. Certaines sociétés sont mortes, d'autres ont refocalisé leurs activités, et nous avons été pris dans ce qui s'appelle souvent le cycle de Gartner (**Encart : « Le cycle de Gartner »**).

## LE CYCLE DE GARTNER

Le cycle de Gartner décrit l'évolution classique d'une phase d'enthousiasme initial suivie d'une désillusion aussi excessive que l'enthousiasme pouvait l'être (**Figure 1**). Ensuite, les choses se stabilisent. Internet en donne un bel exemple : en l'an 2000, il suffisait de concevoir un site avec « .com », et tout le monde s'enflammait. En 2003, tout le monde était désespéré, puis finalement la révolution Internet est quand même arrivée.

Pour la révolution des biocarburants, on est aujourd'hui dans cette espèce de creux et bientôt, probablement, on va de nouveau considérer les choses avec plus de recul et remettre les biocarburants au centre du jeu énergétique.



**Figure 1**

*Le cycle de Gartner prévoit une avancée dans le domaine des biocarburants très prochainement.*

L'utilisation des biocarburants sert non seulement à compléter l'offre énergétique aujourd'hui dominée par les ressources fossiles, mais aussi à lutter contre le réchauffement climatique car ils produisent sur leur cycle de vie moins de CO<sub>2</sub> que les carburants fossiles. D'une certaine façon, ils recyclent le CO<sub>2</sub> atmosphérique : la première étape du cycle des biocarburants est la captation de celui-ci par les plantes photosynthétiques. Cette réduction des émissions de CO<sub>2</sub> est une nécessité de plus en plus criante : les symptômes du réchauffement climatiques deviennent maintenant concrets.

On entend que les biocarburants affament la planète, on entend que les biocarburants ne seront jamais rentables, que les biocarburants ne servent plus à rien parce qu'il y a la voiture électrique (**Figure 2**). Quand on regarde en détail tous ces sujets, on s'aperçoit que tous ces arguments ne tiennent pas la route. Par exemple, dire qu'« on affame la planète », alors

que le sucre est très abondant, à l'échelle mondiale... L'industrie européenne du sucre cherche de nouveaux débouchés. On ne peut vraiment pas dire qu'on soit dans une situation de pénurie alimentaire, et les causes de la malnutrition, dans le monde, sont aujourd'hui politiques, et non pas économiques. Il y a suffisamment de ressources pour tout le monde. On en gaspille d'ailleurs environ un tiers, selon la FAO (Food and Agriculture Organization), et il serait donc assez facile d'améliorer la distribution mondiale. Question de volonté...

« *On ne sera jamais concurrentiel avec le pétrole* » : il se trouve qu'on l'est déjà sur certains marchés particuliers. Le pétrole est utilisé pour les carburants mais aussi pour la cosmétique et les matériaux. Dans ces domaines, les conditions actuelles de marché permettraient de concurrencer le pétrole sans aucune incitation fiscale. Dans d'autres domaines, comme celui des carburants terrestre ou aérien, une fiscalité incitative est nécessaire.



Figure 2

Quelques idées fausses sur le biocarburant : il affame la planète, il est non compétitif par rapport au pétrole et à la voiture électrique...

« La voiture électrique est LA solution » : la voiture électrique prend à l'échelle mondiale une part de marché croissante, et c'est tant mieux. Mais son bénéfice environnemental dépend beaucoup du lieu où l'on se trouve : en Allemagne, par exemple, où l'électricité est produite à partir de charbon, la voiture électrique est très polluante. La pollution est juste délocalisée. Les voitures électriques, par ailleurs, ne sont pas encore polyvalentes, et ne le deviendront peut-être jamais : leur autonomie limitée en fait une bonne « deuxième voiture », mais il faut toujours compter sur la voiture thermique pour faire de longues

distances, par exemple pour partir en vacances. Les voitures électriques représentent environ 2 % du marché, et encore faut-il les subventionner massivement (6 000 € par voiture en France). Le temps où la voiture électrique remplacera la voiture thermique n'est pas encore venu...

Notre activité sert à lutter contre la dépendance de nos sociétés au pétrole : aujourd'hui, l'Europe est complètement dépendante de ses importations (Figure 3). Cela permet d'autre part de lutter contre le réchauffement climatique.

La demande mondiale en pétrole augmente année après année et la production, pour l'instant, suit (Figure 4). Mais un jour, peut-être ne suivra-t-elle plus, et ce jour-là nous nous réjouissons d'avoir pensé à l'avance à des solutions alternatives.

La réalité du réchauffement climatique devient évidente (Figure 5). Réduire la production de CO<sub>2</sub> doit devenir une

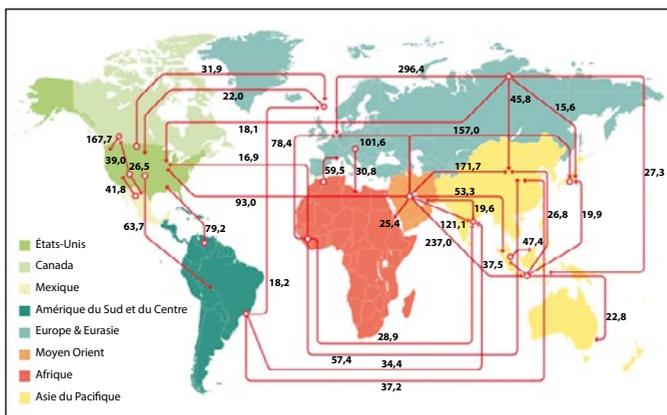


Figure 3

Les biocarburants, une solution pour lutter contre la dépendance liée à l'importation du pétrole.

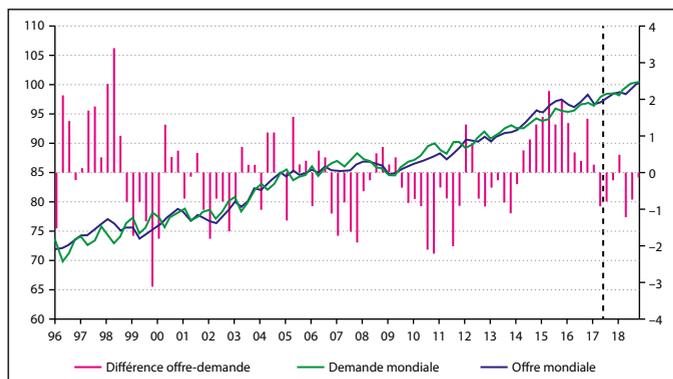


Figure 4

La demande en pétrole ne cesse d'augmenter au cours des années.

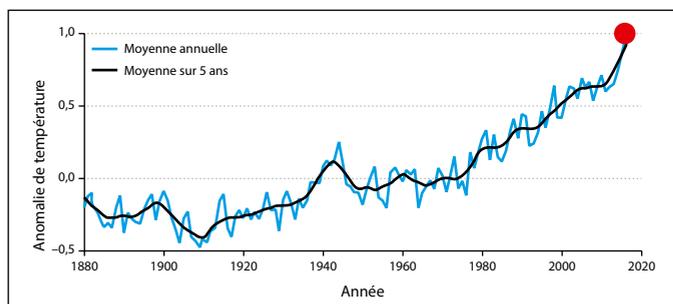


Figure 5

L'augmentation des températures est effective et le réchauffement climatique bien réel.

priorité à l'échelle mondiale. Un nombre croissant de pays s'engage dans des actions ayant pour but de réduire la production de CO<sub>2</sub>, mais les résultats sont encore trop timides. Il est indispensable et urgent que les populations prennent conscience du problème et que les États fassent passer des lois nécessairement impopulaires, pour réduire dans les faits les émissions de CO<sub>2</sub>.

## 2 La voie de l'isobutène

### 2.1. Une molécule indispensable aujourd'hui dérivée du pétrole

Global Bioenergies s'intéresse particulièrement à l'isobutène, un hydrocarbure

aujourd'hui massivement dérivé du pétrole, et dont la formule chimique est devenue son logo (Figure 6). L'isobutène est un hydrocarbure à quatre carbones avec une double liaison ; c'est une des briques élémentaires de la pétrochimie. Aujourd'hui, on tire l'isobutène du pétrole par un procédé qui s'appelle le vapocraquage<sup>2</sup>. On en produit 15 millions de tonnes par an et il est à la base de quantités de produits : des carburants, des plastiques (le plexiglas, par exemple), des caoutchoucs... il y en a beaucoup dans la cosmétique, dans la chimie fine...

2. Vapocraquage : procédé permettant d'obtenir, par fractionnement de molécules de grandes tailles issues du pétrole, des molécules plus petites comme l'isobutène.



Figure 6

Global Bioenergies s'est spécialisée dans l'isobutène, une molécule indispensable dans de nombreux domaines.

Les micro-organismes ne produisent pas naturellement d'isobutène, car sa nature gazeuse s'oppose à une métabolisation efficace. Dans la nature, il n'y a ni bactérie, ni levure, ni champignon qui produise de l'isobutène en quantité significative.

## 2.2. Faire produire de l'isobutène par les bactéries !

Pour faire produire cette molécule par des micro-organismes, il faut inventer de toutes pièces une voie métabolique artificielle (**Figure 7**). En 2008, des fonds ont été levés auprès de Seventure, la branche capital risque du groupe BPCE, sur la base d'un projet papier. Il s'agissait de démontrer qu'on pouvait forcer les bactéries à produire

de l'isobutène. Un petit laboratoire a été monté, des bactéries ont été modifiées en utilisant une approche innovante de biologie synthétique, et nous avons obtenu la preuve de concept de notre procédé : à petite échelle, des bactéries ont, pour la première fois, converti du sucre en isobutène.

C'était une grande victoire scientifique qui a été reconnue par le monde académique. Cela a été en fait le point de départ d'une longue épopée qui nous emmène depuis 2008 sur la voie de l'industrialisation (**Figure 8**). Une fois qu'on avait ce point de départ, il s'agissait ensuite de réaliser deux choses.

Il fallait d'abord améliorer le rendement de ce procédé. Les bactéries d'origine

Figure 7

Modification d'un organisme pour qu'il produise de l'isobutène.

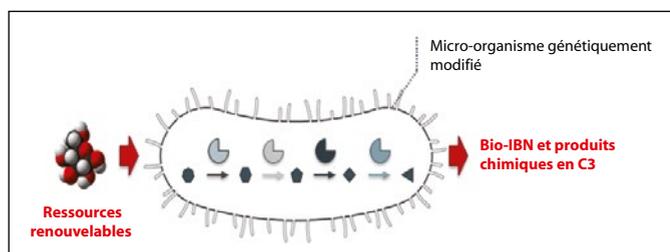
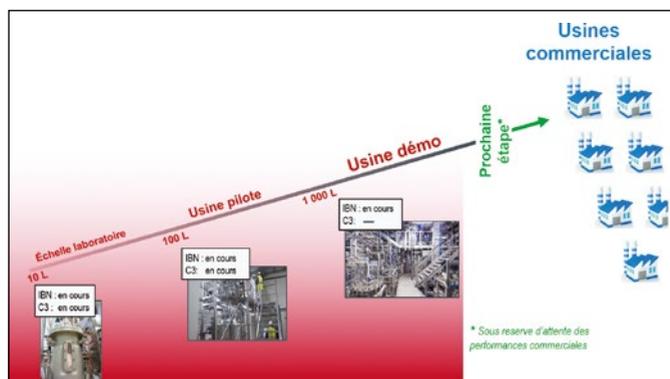


Figure 8

Production d'isobutène : du laboratoire à l'usine commerciale.



convertissent 1 molécule de sucre sur 10 millions en isobutène. Il faut améliorer le procédé d'un facteur très important, et aujourd'hui on se retrouve, après de longues années d'efforts, des problèmes et des solutions, avec une bactérie qui convertit jusqu'à 90 % du sucre qu'on lui donne en isobutène. On n'est pas encore tout à fait au but, on continue à travailler d'arrache-pied pour encore améliorer les performances du procédé. Il s'agit de créer de nouvelles souches, et de les tester à l'échelle du laboratoire.

Ensuite, il nous a été nécessaire de sortir du laboratoire pour réaliser la mise à l'échelle industrielle du procédé. Les premiers kilos d'un hydrocarbure gazeux étaient déjà associés à des contraintes de sécurité : un pilote d'une capacité de 10 tonnes par an a été installé sur le site de Pomacle (près de Reims), dans un environnement anti-explosif (ATEX).

Le pilote fonctionne depuis 2015 et a permis de valider le procédé à cette échelle.

L'échelle suivante, c'est le démonstrateur industriel. Alors que le pilote était le prolongement du laboratoire, le démonstrateur est vraiment une usine modèle réduit. Il a fallu designer ce démonstrateur, le financer et le construire. À l'issue de longs efforts, la construction a été terminée et le démonstrateur a pu démarrer à l'été 2017. Ce démonstrateur est installé en Allemagne sur une raffinerie près de Leipzig. C'est la dernière étape avant les usines de pleine taille. Un premier projet est déjà en préparation.

### 2.3. Avec quelles ressources ?

La **Figure 9** reprend les différentes ressources qu'on peut utiliser. La première génération réunit toutes les plantes ayant initialement une vocation alimentaire, telles que le

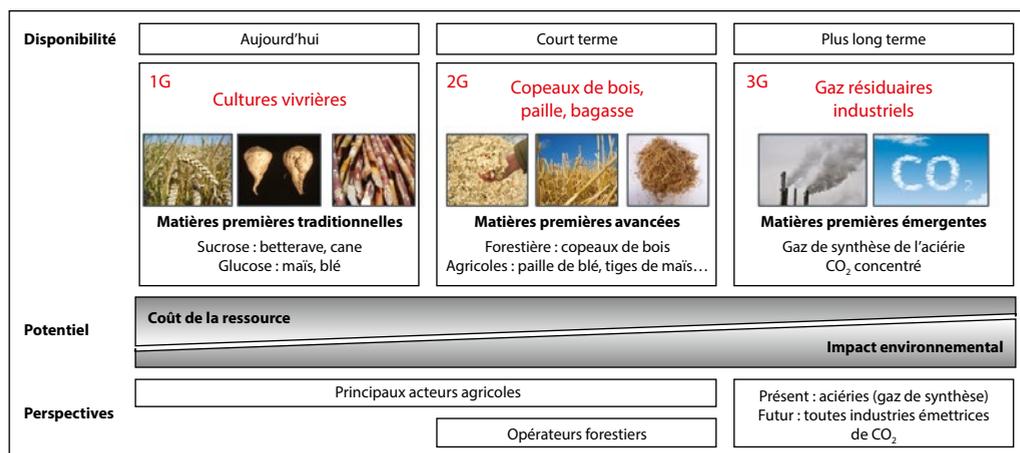


Figure 9

Des ressources variées peuvent être transformées en isobutène.

blé, le maïs, la canne à sucre ou la betterave. Cette dernière est abondante en Europe, et une partie de la production est naturellement non alimentaire (la mélasse).

Les ressources de deuxième génération sont issues de déchets : la paille (déchets agricoles) ou les copeaux de bois (déchets forestiers). Ces matières, dites lignocellulosiques, contiennent plus de la moitié de leur masse en sucres, qui se présentent sous une forme extrêmement compacte. Il est difficile de les extraire et de les purifier, mais de nombreuses sociétés travaillent sur des procédés innovants, qui permettent de les rendre accessibles. Des essais de fermentation utilisant ces matières premières ont déjà été réalisés par Global Bioenergies, en laboratoire d'abord, puis en pilote. L'Europe a alloué des fonds importants à la société pour pousser le développement de ces nouvelles filières qui permettront demain la conversion de déchets en carburants et en matériaux.

La troisième génération consiste à utiliser les rejets

industriels comme matière première, et ne sera pas développée dans ce chapitre parce que son horizon de développement est plus lointain.

#### 2.4. Le premier projet d'usine de production d'isobutène pour des applications diversifiées

La **Figure 10** reprend l'isobutène avec des applications dans les carburants, dans la vraie essence, dans les matériaux, dans la cosmétique.

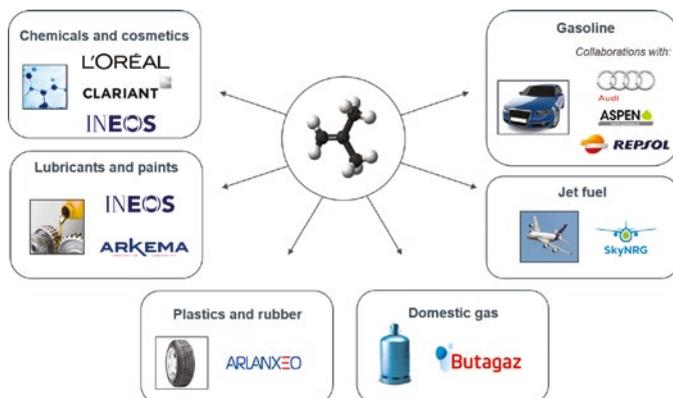
La **Figure 11** présente le projet de première usine de pleine taille développé avec Cristal Union<sup>3</sup>, qui est le quatrième sucrier européen, le deuxième acteur du sucre en France, et commercialise son sucre sous les marques Daddy et Erstein. L'industrie de la transformation de la betterave produit du sucre de table, de l'éthanol pour les carburants et de l'éthanol pour les spiritueux.

Ce projet de première usine vise une capacité de 50 000 tonnes d'éthanol et dérivés, installée juste à côté d'une sucrerie de Cristal

3. [www.cristal-union.fr](http://www.cristal-union.fr)

**Figure 10**

*L'isobutène, une molécule aux multiples applications.*



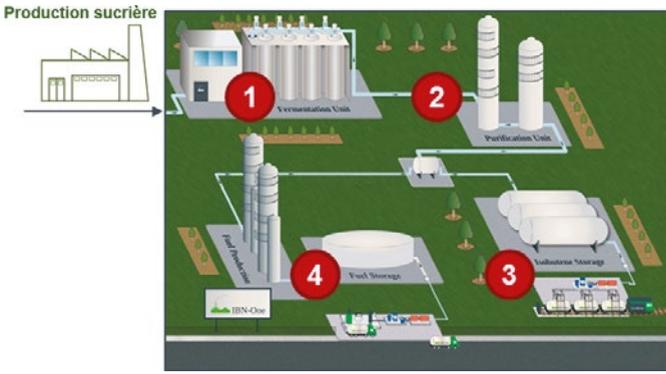


Figure 11

La première usine d'isobutène pourra produire 30 à 50 000 tonnes d'isobutène par an.

Union. Le sucre va aller à l'unité de fermentation et être converti en isobutène. Celui-ci sera évacué par le haut, parce c'est un gaz, dans un mélange d'air, de CO<sub>2</sub> et d'un peu de vapeur d'eau. Il va être conduit à une petite unité de purification, l'unité 2, qui est très simple et qui est déjà en fonction dans notre démonstrateur. Puis il va aller vers un petit aiguillage qui l'enverra vers l'unité de stockage – ce sont les mêmes « cigares » que pour le GPL (butane, propane ...) –, soit vers une petite unité de conversion, qui permettra de produire des dérivés de l'isobutène directement incorporables dans l'essence : l'isooctane, produit par la condensation de deux molécules d'isobutène entre elles, est la molécule à partir de laquelle on a défini l'indice d'octane, donc l'isooctane, par définition, c'est du super 10. Sera aussi produit de l'ETBE (éther d'éthyle tertiobutyle), un des additifs essence très utilisés aujourd'hui. Ces composés, l'isooctane et l'ETBE, ont de très bonnes propriétés liées à leur indice d'octane élevé, et produisent bien moins de particules que l'essence fossile produite dans les raffineries. L'ingénierie amont de l'usine a déjà été réalisée (par Technip

notamment). La construction de l'usine coûtera un peu plus de 100 millions d'euros et IBN-One, la filiale commune entre Global Bioenergies et Cristal Union, s'attache aujourd'hui à réunir ces fonds. Deux ans seront nécessaires à la construction : le démarrage de l'usine est prévu en 2021.

Un certain nombre d'industriels renommés ont été attirés : sur la partie amont, Cristal Union, puis aussi sur la deuxième génération (le sucre de paille), Clariant, puis sur la partie aval, Audi pour l'essence, L'Oréal pour les cosmétiques, Butagaz pour le butane (Figure 12).

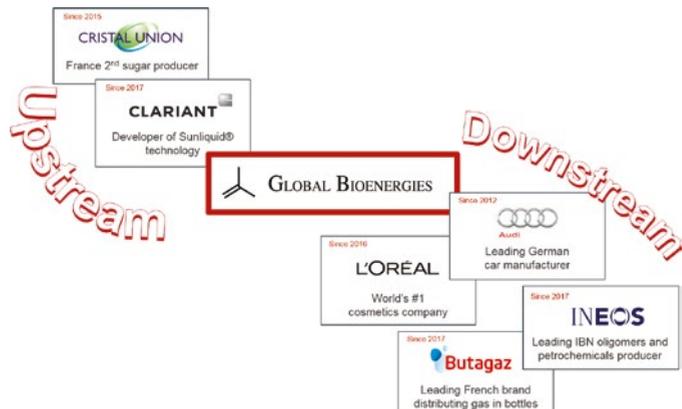


Figure 12

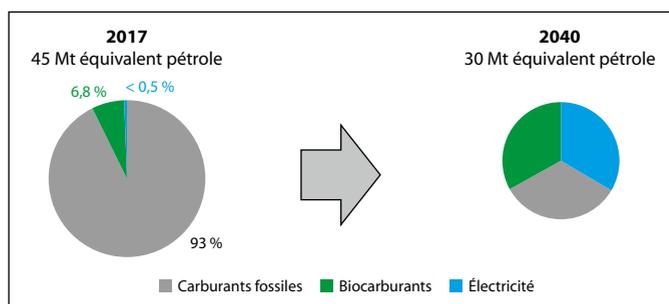
Une multitude d'industriels renommés sont intéressés par la production d'isobutène par les bactéries.

## Les biocarburants : une solution à combiner avec l'électrique

Voici notre vision pour 2040 (**Figure 13**). On entend beaucoup parler de la voiture électrique, qui devait être amenée à remplacer en totalité les voitures thermiques d'ici 2040. Nous pensons que la voiture électrique va prendre une place importante de la mobilité terrestre, mais qu'elle restera minoritaire à long terme. Peut-être occupera-t-elle la niche de la deuxième voiture des familles, c'est-à-dire au maximum 30 % du transport routier.

Aujourd'hui, les carburants routiers représentent en France 45 millions de tonnes de pétrole, à côté duquel on trouve un peu de biocarburant et un tout petit peu d'électrique.

Notre vision est la vision des quatre tiers : on va réduire d'un tiers la consommation globale d'énergie pour le transport routier : voitures moins lourdes, moteurs plus efficaces, transports en commun... Il n'est pas besoin ici de solution de rupture, il suffit de mettre en place ce qui existe déjà. Ensuite, on voit une énergie répartie grossièrement en trois tiers : un tiers électrique – c'est très ambitieux –, un tiers de carburants fossiles, et un tiers de biocarburants.



**Figure 13**

En 2040, Global Bioenergies souhaite une répartition équitable de l'énergie électrique, des biocarburants et des carburants issus du pétrole dans les transports.

La France a un système électrique particulier avec le nucléaire, et possède aussi un très important gisement d'électricité renouvelable ; elle a aussi la première agriculture d'Europe. En développant, en parallèle, ces deux filières, la France a les cartes pour devenir le leader mondial de la transition énergétique et environnementale. Ce plan concret prévoit qu'en 2040, elle ait sa consommation de pétrole de 75 %, et ses émissions de CO<sub>2</sub> de 60 %.