Séance du 5 décembre 2023

ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

Conférence-débat d'Alain Marty avec Michael Matlosz

LES ENZYMES : UNE SOLUTION ÉLÉGANTE À LA FIN DE VIE DES PLASTIQUES

Approximativement 400 millions de tonnes de plastiques sont produites dans le monde chaque année, dont près de 100 millions de tonnes de PET (Polyéthylène Téréphthalate), utilisé pour la fabrication des bouteilles et des fibres polyester. Résultat, 50 millions de tonnes de déchets chaque année, dont 9 millions de tonnes qui finissent dans les mers et les océans. Pour autant, le plastique nous rend de fiers services, ne serait-ce que sous forme d'emballages dans un monde capable de gâcher 1,3 milliards de tonnes de nourriture par an !

Or, jusqu'ici seulement 10 % de déchets plastiques sont recyclés, et la méthode la plus courante pour le faire est un procédé thermo-mécanique, qui consomme beaucoup d'énergie et soumet le plastique à de fortes températures qui réduisent ses performances.

L'entreprise Carbios est née de ce double constat et d'une idée totalement innovante : utiliser une enzyme, c'est-à-dire un matériel biologique, pour dépolymériser le plastique. Un objectif en tête : ne plus partir du pétrole pour produire du plastique mais produire du plastique à partir de déchets. Faisant entrer l'industrie du plastique dans le cycle vertueux de l'économie circulaire. Une promesse qui a déjà séduit des géants de l'industrie comme L'Oréal, Nestlé Waters, PepsiCo et Suntory Beverage.

Mais l'innovation Carbios ne s'arrête pas là. Ses chercheurs développent également des solutions pour rendre biodégradable et compostable le PLA (Poly Lactic Acid), un plastique utilisé notamment pour la fabrication d'emballages, de vaisselle jetable, de pots de yaourts ou de capsules de café. Là encore, il s'agit de créer une économie circulaire, élargie au CO_2.

Une vraie révolution technologique, et écologique, qui ouvre l'ère du plastique recyclable à l'infini.

Alain Marty. Ingénieur de l'Institut national des sciences appliquées (INSA) de Toulouse, Alain Marty a d'abord été enseignant-chercheur à l'INSA de Toulouse, spécialisé en enzymologie. Il est aujourd'hui directeur scientifique de Carbios, une entreprise spécialisée dans la conception et le développement de procédés enzymatiques en vue d'une biodégradation ou d'un biorecyclage des matières plastiques. Il a reçu, en 2022, le prix Biocat notamment pour son travail de recherche sur l'optimisation d'enzymes dépolymérisant le PET. Il est membre de l'Académie des technologies.

Michael Matlosz. Ingénieur chimiste diplômé de l'Institut de Technologie de l'État du New Jersey et docteur en génie chimique de l'Université de Californie à Berkeley, Michael Matlosz a démarré sa carrière de chercheur à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne en Suisse. Il a ensuite été professeur et directeur de l'École nationale supérieure des industries chimiques de Nancy (ENSIC-Nancy) puis président directeur général de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Il est aujourd'hui président de l'association EuroScience, professeur à l'ENSIC – Nancy et membre de l'Académie des technologies.

Exposé d'Alain Marty **2**
Débats **6**

Exposé d'Alain Marty

Pas question de remettre en cause l'utilité des plastiques dans nos vies quotidiennes. Ni même ses vertus écologiques ! Pour ne prendre qu'un exemple, le plastique qui constitue 30% d'une voiture, permet de produire des véhicules moins lourds, moins énergivores, et donc de réduire la production de CO_2… Le plastique, c'est fantastique, comme le chantait Elmer Food Beat. Ce qui est catastrophique, c'est le déchet plastique. Un demi-milliard de tonnes de plastique sont produits chaque année, soit environ 15 tonnes à la seconde ! Ce qui conduit à 150 millions de tonnes de déchets plastiques par an, dont seulement moins de 10% sont recyclés. 9 millions de tonnes de plastique finissent dans les mers et les océans chaque année, soit 18 tonnes à la minute.

Passer d'une économie linéaire à un modèle plus circulaire

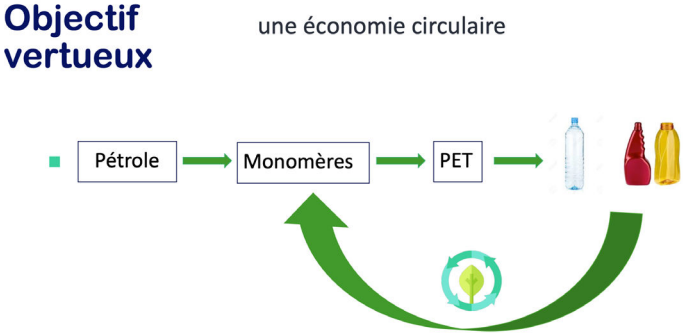
Lorsque Jean-Claude Lumaret en 2011 a créé Carbios, c'était dans le but de résoudre ce problème de la fin de vie des plastiques dont on ne s'est jamais soucié depuis que cette matière existe, sauf peut-être ces dernières années, alors qu'il en a été fabriqué près de 9 milliards de tonnes depuis 1950.

Nous sommes aujourd'hui dans une économie très linéaire. À partir de pétrole, on fabrique des monomères, puis un plastique donné, et enfin un objet qui est à usage unique : on l'utilise, souvent une seule fois, et ça devient un déchet.

Une voie de recyclage existe, au moins sur le plastique PET (Polyéthylène Téréphthalate), mais elle repose sur un procédé thermo-mécanique qui est loin d'être parfait : on chauffe le polymère, on le fait fondre (pour le PET à 270 degrés), on en refait des granules dits « pellets » et puis éventuellement une bouteille. Mais ce plastique recyclé n'est utilisé au mieux qu'à 25% dans une nouvelle bouteille. Autre inconvénient de ce procédé, on chauffe la matière à très haute température, ce qui a pour conséquence de la dégrader. Et il n'y a aucune purification. Donc au fil des cycles, on accumule des impuretés.

Une idée plus satisfaisante serait de développer une économie plus circulaire à grande échelle, ce qui nécessite de revenir aux monomères qui ont servi à faire ce plastique, et de les purifier (Figure 1). C'est la grande idée à l'origine de Carbios.

Figure 1



L'aventure du recyclage biologique

Le PET est le deuxième polymère le plus utilisé dans le monde. On en produit à peu près 100 millions de tonnes par an, un tiers dédié à faire des barquettes et des bouteilles, deux tiers, des fibres textiles. En réalité, le marché du PET c'est celui du polyester plus que celui de l'emballage. Un marché en forte croissance : on prévoit qu'en 2050, le marché aura quasiment doublé. Mais pas en doublant les quantités de PET pétrochimique : il s'agira bien plus de recyclage. Le procédé thermo-mécanique prendra donc de l'ampleur mais il n'aura pas accès à assez de déchets, parce qu'il se limite aux bouteilles claires et ne peut utiliser le coloré ni pour refaire des emballages ni des textiles – qui sont le principal marché visé.

Dans ce contexte, l'aventure à laquelle Carbios entend participer, c'est de développer ce qu'on appelle les recyclages circulaires, chimiques ou biologiques, qui devraient représenter un bon tiers du marché en 2050.

Le principe est simple. Le PET est produit à partir de deux monomères : un diol, l'éthylène glycol, et un diacide, l'acide téréphtalique. La grande idée de Carbios consiste à les purifier puis à les remettre à des polymèristes qui ne devront absolument rien changer à leur procédé, et à partir d'un vieux t-shirt, pourront refaire une bouteille d'eau claire. Et ce, en utilisant non pas un catalyseur chimique, mais une enzyme.

Nous sommes aidés dans cette démarche par des règlementations de plus en plus sévères, en particulier en Europe qui, par exemple dans sa directive Single-Use Plastics, demande à ce que 30% des bouteilles soient recyclées en 2030 et 65% en 2040. Autres alliées, les annonces faites par les grandes marques qui, poussées par les consommateurs, veulent que dès 2025, leurs emballages ou leurs t-shirts soient en très grande partie

recyclés. Or, il n'existe pas à ce jour de solutions vraiment efficaces à court terme pour remplir ces objectifs.

Enfin, depuis quatre ou cinq ans, il y a une décorrélation totale entre le prix du recyclé et le prix du thermo-mécanique. La demande est telle qu'aujourd'hui il y a un vrai marché à prendre autour du PET recyclé. En 2022, il était 44% plus cher que le PET issu de la pétrochimie.

Pourquoi utiliser une enzyme?

Le procédé que nous développons aujourd'hui à l'échelle industrielle est relativement simple. Il consiste à mettre des déchets plastiques dans des réacteurs de 300 à 400 mètres cubes. Il est nécessaire de les prétraiter puis on ajoute de l'eau, et simplement une enzyme qui commence immédiatement à dépolymériser.

L'avantage d'une enzyme, par rapport à un catalyseur chimique, est d'être très sélective. Ce qui dispense d'avoir un tri très drastique à l'entrée. On peut ainsi traiter des déchets en mélange contenant 70/80% de PET et contenant du polyéthylène, du polyamide, du polyuréthane, du coton. On est aussi capable de traiter des matériaux complexes, par exemple les barquettes alimentaires qui sont souvent des mélanges de PET et de polyéthylène. C'est l'enzyme qui fait le tri. Elle ne dégrade que le PET, ce qui simplifie la purification des monomères. Autre avantage, le travail se fait à basse température (60/70 degrés), à pression atmosphérique, et aucun solvant n'est utilisé dans le procédé.

Certaines sociétés comme celles de l'Américain Eastman et du Canadien Loop, qui installent aujourd'hui des usines en France, développent des procédés chimiques et produisent, non pas de l'éthylène glycol et de l'acide téréphtalique, mais du diméthyl téréphthalate. L'inconvénient, c'est que lorsqu'elles investissent dans une usine de recyclage, elles doivent parallèlement construire une usine de synthèse du PET dédiée parce que les unités actuelles ne sont pas capables d'utiliser du diméthyl téréphthalate. Alors que notre procédé est un système de plug and play : on peut raccorder notre unité de recyclage directement sur une unité existante. Et c'est ce qu'on va faire dans le Nord-Est de la France, à Longlaville, sur un site existant de production de PET opéré par Indorama – le seul en France – .

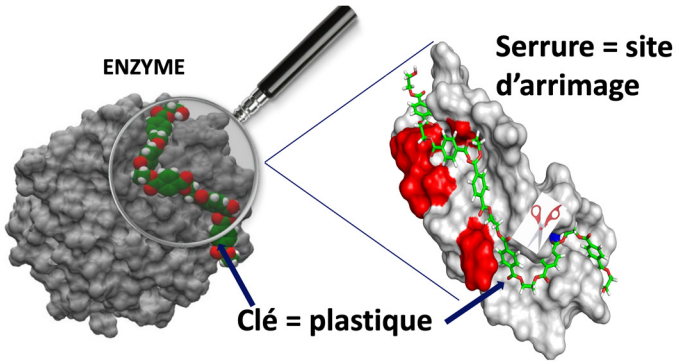
Qu'est-ce qu'une enzyme?

Une enzyme est un polymère un peu compliqué obtenu à partir de 20 briques de base, 20 acides aminés, qui prend une structure très définie dans l'espace en trois dimensions, et qui a été inventé par la nature pour accélérer les réactions. Toutes les réactions qui se produisent dans nos cellules sont catalysée par des enzymes.

La nature n'ayant pas – encore – inventé d'enzymes pour dégrader le PET ou les plastiques, notre activité chez Carbios, consiste à accélérer ce rôle d'évolution et à trouver des enzymes qui, un peu par hasard, dégradent le plastique – elles ont un autre rôle dans la nature – et à les faire évoluer pour qu'elles dégradent le plastique qui nous intéresse.

Si l'on considère que le substrat, en l'occurrence ici le plastique, est une clé, cette clé doit se loger dans une partie spécifique de l'enzyme (le site actif) que l'on peut appeler la serrure (Figure 2). Elle s'y fixe pour des raisons de géométrie, de charge électrique et d'hydrophobicité. Or, les enzymes qui ont été découvertes comme dégradant le PET ne sont pas à l'origine faites pour ça – mais pour dégrader la paroi des végétaux – donc la serrure est mal adaptée à la clé. Notre métier chez Carbios est de redesigner cette serrure pour que cette clé spécifique qu'est le PET pénètre mieux dans ce site actif.

Figure 2



Carbios, un modèle collaboratif innovant

Carbios a été créée en 2011, et cotée en bourse dès 2013. Nous avons levé à l'époque 14 millions d'euros alors que nous n'avions pas le début d'un résultat ! Idée assez unique en France, nous avons décidé de travailler très activement avec le milieu académique et nous avons créé très tôt un laboratoire collaboratif dans le TBI (Toulouse Biotechnologie Institute) à l'INSA de Toulouse, où j'ai été chercheur pendant près de 30 ans. Aujourd'hui nous sommes quinze chercheurs Carbios à collaborer avec une dizaine de chercheurs de ce laboratoire dédié à la découverte, à la caractérisation et à l'optimisation de nos enzymes. Il s'agit là d'un modèle particulièrement intéressant qui réunit des chercheurs du public et du privé qui travaillent tous les jours sur le même lieu, avec les mêmes objectifs. Pour nous, c'est notamment un moyen de profiter de multiples plateformes technologiques pour produire nos enzymes, les optimiser, cribler des millions de variants par jour en faisant de la micro fluidique par exemple, de faire de la RMN, ou de la diffraction aux rayons X, tout en profitant des énormes compétences des chercheurs du laboratoire.

PET recyclable, PLA biodégradable : les deux challenges de Carbios

Dès 2012, Jean-Claude Dumaret avait déjà en tête les deux projets sur lesquels nous travaillons aujourd'hui. Les deux, à l'époque, me paraissaient être de grands défis, je n'y croyais pas trop, mais l'expérience m'a donné tort ! Pendant un an et demi, c'était vraiment le cauchemar. On travaillait avec de toutes petites quantités de PET dans de petits réacteurs, en y mettant des tonnes d'enzymes et notre record, au bout d'un an et demi, c'était 3% de conversion en seize semaines… Mais finalement, avec un peu de persévérance, nous avons avancé. Le professeur Gérard Goma, qui a beaucoup compté dans ma carrière, disait : « travaille aux interfaces si tu veux créer de l'innovation. » Une des clés du succès de Carbios tient sans doute là. Je suis certain que des enzymologistes n'auraient pas réussi seuls, des polymeristes non plus. C'est le fait de travailler à l'interface entre ces deux sciences qui nous a permis de réussir.

Comme tout bon scientifique, au début du projet, nous avons fait de la bibliographie et développé un test qui nous a permis de comparer toutes les enzymes décrites comme capables de dégrader le PET. Nous les avons classées, et nous avons choisi la meilleure comme base : la LCC, découverte en 2012 par un groupe japonais. Nous avons choisi la plus thermo-stable, mais notre premier défi a été d'améliorer encore sa stabilité. Ce que nous voulions, c'est une enzyme qui ait un Tm (melting temperature, paramètre de mesure de la thermo-stabilité des enzymes) supérieur à 90 degrés, afin qu'elle puisse travailler des heures à 70 degrés. Collaborer avec le TBI nous a permis d'accéder à des technologies rares dans le monde de l'enzymologie, et finalement de gagner dix degrés et d'atteindre aujourd'hui l'objectif qu'on s'était fixé. Une enzyme qui a une thermo-stabilité de 94 degrés, ce n'est pas très courant ! Cette enzyme est un vrai caillou et peut travailler des heures à très haute température sans être dénaturée.

Deuxième volet, nous avons joué au petit serrurier. Nous avons obtenu la structure tridimensionnelle de l'enzyme par diffraction aux rayons X, puis par modélisation moléculaire, nous avons placé une chaîne de PET dans ce qu'on croyait être le site actif de l'enzyme, et ainsi identifié tous les acides aminés en contact avec cette chaîne de PET : ce sont à peu près 50 acides aminés qui constituent la serrure. Puis nous avons construit environ 1000 variantes de cette enzyme et développé un crible robotisé qui nous a permis de tester l'activité de dégradation de nanoparticules de vrai déchet de PET. Enfin, nous avons combiné les meilleures mutations, et ainsi obtenu un variant qui a connu un premier succès, le LCCiccg, qui est à la fois très actif et très thermo-stable.

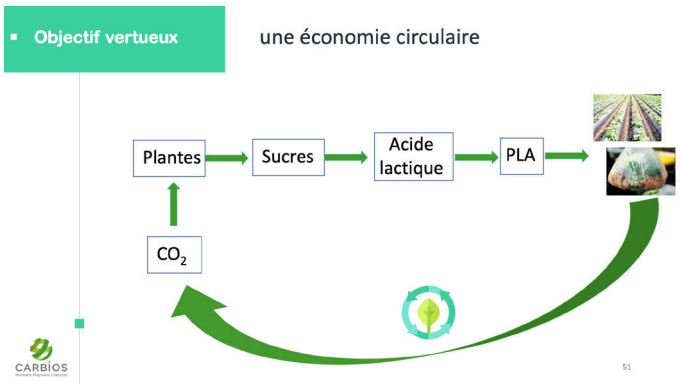
Bien loin de nos 3% en seize semaines, on obtient désormais 98% de dégradation en 24h, en travaillant à 200 grammes de plastique par litre dans le réacteur – ce qui est déjà très concentré – , à 68 degrés. Pour simplifier la purification, les deux produits uniques de la réaction sont l'acide téréphtalique et l'éthylène glycol.

La productivité moyenne de notre réacteur sur l'ensemble de la réaction est aujourd'hui de 7 grammes par litre et par heure. En 2020, tout ce travail d'évolution de l'enzyme, mené en collaboration avec TBI, a été accepté dans la revue Nature.

L'autre grand projet de Carbios concerne le PLA (Poly Lactic Acid), un plastique moins utilisé que le PET – seulement 400 à 500 000 tonnes aujourd'hui – , mais un plastique d'avenir. Le PLA est constitué d'un seul monomère, qui est l'acide lactique. C'est un polymère biosourcé – c'est-à-dire produit à partir de plantes – , biodégradable à haute température. Sa limite, c'est qu'en dessous de 60 degrés, il n'est ni biodégradable ni compostable. Le projet de Carbios fut d'y remédier.

Il s'agit là encore d'une économie circulaire, mais on a élargi le cercle : c'est une économie circulaire sur le CO_2 (Figure 3). L'idée, c'est d'introduire – par extrusion – une enzyme dans le plastique, qui va assurer sa biodégradation. Le PLA fond à 170 degrés. On a développé des tests, et fini par identifier une enzyme qui avait un Tm élevé mais une activité faible. Nous avons redesigné son site actif, multiplié par 80 son activité. Et finalement, obtenu cette enzyme à la fois très thermo-stable et qui présentait une activité supérieure à l'enzyme qu'on avait préalablement identifiée. Mais là aussi, il fallait travailler aux interfaces parce que cela ne suffisait pas. Très vite on a compris que c'était le couple haute température/eau qui posait problème. Une enzyme c'est soluble dans l'eau, c'était donc mieux de l'avoir en phase aqueuse pour bien la disperser dans le polymère. De là est venue l'idée d'essayer de mettre l'enzyme dans un polymère à bas point de fusion, plutôt que directement dans du PLA. Et une fois que cette enzyme est uniformément dispersée dans ce qu'on appelle un lot concentré dit « masterbatch », utiliser ce « masterbatch » pour l'introduire dans le PLA. On obtient alors ce PLA qui contient l'enzyme qui assurera sa biodégradation. Et ça marche !

Figure 3



Carbios aujourd'hui

Depuis, nous avons continué à améliorer la thermo-stabilité de l'enzyme qui dégrade le PET. Et aujourd'hui, nous avons dû développer des appareils spécifiques pour nos activités parce qu'on a un Tm supérieur à 100 degrés. Nous avons également travaillé à optimiser cette enzyme. Nous collaborons notamment avec l'École Polytechnique où nous allons étudier l'absorption de l'enzyme sur des nanoparticules de PET. Et avec l'Université de Bordeaux, où l'on a développé un crible micro fluidique qui nous permet de tester des millions de variants dans une demi-journée, ce qui a largement augmenté nos capacités de criblage.

Mentionnons au passage que Carbios n'a pas vocation à produire ses propres enzymes mais collabore avec le groupe danois Novozymes, leader mondial de la production d'enzymes.

Notre plus gros réacteur est aujourd'hui un réacteur de 20 mètres cube sur notre démonstrateur industriel. Cela représente deux tonnes de plastique par lot dit « batch », soit 100 000 bouteilles ou 20 000 t-shirts recyclés. Nous travaillons à un gramme d'enzymes par kilo, et la mise à l'échelle a été facile. Ensuite, nous avons développé un schéma de purification, à partir de déchets – bouteilles, barquettes ou textiles – , et nous sommes capables d'obtenir de l'acide téréphtalique et du MEG pur à plus de 99,5%.

Dès le premier essai, nous avons été capables de produire du PET de haut poids moléculaire. Mais il nous a fallu plus d'efforts pour arriver à un PET parfaitement blanc qui nous permet aujourd'hui de faire de belles bouteilles, et de travailler avec de grandes marques dans l'emballage comme L'Oréal, Nestlé Waters, PepsiCo et le groupe japonais Suntory. On a produit des centaines de kilos de PET, et chacune de ces grandes marques sur son pilote a produit des bouteilles parfaitement claires. Des analyses très poussées nous prouvent qu'on peut les utiliser dans l'agroalimentaire, ainsi qu'une première analyse de cycle de vie. Notre chiffre, aujourd'hui en France, c'est 57% de réduction d'émission de CO_2 par rapport à du PET vierge qui finit en enfouissement ou en incinération. Nous avons aussi créé un consortium textile en 2021, avec Puma, Salomon, Patagonia, et On running. Et nous sommes en train de construire une unité à Longlaville, en Meurthe-et-Moselle, avec le groupe thaïlandais Indorama, numéro un mondial : une unité de 50 000 tonnes qui sera opérationnelle fin 2025.

Évidemment tout cela est un travail d'équipe (Figure 4). Aujourd'hui, nous sommes 150 chez Carbios. Sur l'image ci-dessus, on voit – à gauche – mon équipe à Toulouse, à TBI. À côté, l'équipe du labo du pilote et du démonstrateur industriel à Clermont-Ferrand. Tout au bout, à droite, Emmanuel Adam, notre PDG actuel et enfin, à sa gauche, notre mentor à tous, Philippe Pouletty, le directeur général des fonds Truffle Capital et le président de notre conseil d'Administration, qui nous pousse tous les jours à mieux faire.

Figure 4



Carbios Corporate presentation, 2023



Débats

Michael Matlosz : Après l'installation de la première grande usine en Meurthe-et-Moselle, peut-on imaginer une nouvelle génération qui serait moins volumineuse? Ou sommes-nous à la limite du possible, en termes de volume et de taille?

Alain Marty : On estime que les deuxième et troisième unités seront plus grandes, mais pas beaucoup plus. Aujourd'hui, une unité de production de PET peut représenter 1 million de tonnes. Je ne crois pas qu'il existe un jour une unité de recyclage d'1 million de tonnes, tout simplement parce que c'est un compromis entre la taille de l'unité - économiquement l'unité la plus grosse possible permet de faire des économies d'échelle -, et faire venir des déchets dans une zone géographique. Si l'on veut développer un procédé un peu écologique, il ne faut pas faire venir des plastiques de l'autre bout du monde.

Michael Matlosz : Vu de Nancy, Longwy c'est un peu le bout du monde, je suppose qu'il faut quand même du transport…

Alain Marty : C'est une zone qui a été choisie parce qu'on est à la frontière entre le Luxembourg, la Belgique, l'Allemagne et évidemment la France. Mais on ne va malheureusement pas chercher les plastiques à 50 kilomètres, ce qui serait mon rêve…

Dans le cas des traitements de recyclage, le problème de la collecte semble un facteur considérable. Est-ce exact?

Alain Marty : C'est tout à fait exact. La collecte des bouteilles plastiques fonctionne plutôt bien, du moins en Europe. En revanche, la collecte des vêtements est à peu près inexistante. Mais il y a aujourd'hui une pression forte de l'Europe pour mettre en place une filière de collecte et de recyclage des textiles. Tout à est à faire ou presque. Pour les activités de Carbios, c'est un élément-clé. Notre première unité est alimentée à raison de 50 000 tonnes par an. Bien qu'on produise 100 millions de tonnes de PET, trouver 50 000 tonnes de déchets dans le Nord-Est de la France, cela reste un challenge sur lequel on travaille.

Comment se fait l'équilibre entre le tri en amont et la souplesse de la machine?

Alain Marty : Très bonne question! Aujourd'hui, on est capable de traiter absolument tous les plastiques en PET. L'équilibre, c'est un équilibre économique qui tient à la productivité du réacteur. Si vous rentrez un déchet qui contient 60% seulement de PET, à la fin vous aurez 40% de déchet. Un déchet à traiter coûte 200 à 250€ la tonne. Vous voyez ce que cela représente sur une unité de 50 000 tonnes. Il s'agit d'un équilibre économique entre le prix du déchet - évidemment, moins il est pur moins il est coûteux - et la rentabilité globale. Aujourd'hui, notre approvisionnement c'est 90% de PET sur l'emballage. On est un peu plus tolérant sur le textile (on vise 80%) parce que les méthodes de tri n'ont pas été encore suffisamment développées.

Et pour obtenir 90% de PET dans nos déchets, les procédés en amont de tri existent…

Alain Marty : Pour les bouteilles, c'est un marché qui existe. Aujourd'hui les bouteilles sont extrêmement bien triées, et notre matière première, c'est le rebut de tout le thermo-mécanique : les barquettes, le coloré, l'opaque… C'est surtout dans les textiles qu'il n'y a pas de collecte, pas de tri. Mais il y a de très grandes entreprises aujourd'hui comme les norvégiens Tomra, leaders mondiaux sur la vente de machines de tri, qui sont en train de développer des technologies très pointues pour séparer les textiles. C'est un marché en émergence, tout est en construction.

On a bien compris que le PET était particulièrement intéressant pour être dégradé par des enzymes. Est-ce qu'à l'avenir on peut espérer que d'autres plastiques, d'autres polymères pourraient avoir le même traitement avec d'autres enzymes?

Alain Marty : Pour le moment, mes équipes sont surtout concentrées sur le PET, mais on a démarré il y a un peu plus d'un an un nouveau projet sur le polyamide. On ne peut pas encore parler des résultats, mais on commence à avoir des enzymes capables de dégrader le polyamide et de revenir au monomère. Exactement le même processus que sur le PET. Un autre projet en cours, encore à l'état embryonnaire, serait de s'attaquer aux polyoléfines. C'est le rêve de Jean-Claude Dumaret et Philippe Pouletty, mais d'un point de vue enzymatique, briser la liaison carbone/carbone est un tout autre challenge!

Avez-vous un accès au financement suffisant pour profiter de votre avance, et au moins bien occuper le théâtre européen ?

Alain Marty : Carbios a été vraiment bien soutenue par l'État, par l'Europe. On a eu beaucoup de pression amicale aussi pour créer cette première unité en France et on a aussi été soutenu pour obtenir un permis dans un temps record (neuf mois !), ce qui était pour nous un critère important.

Denis Ranque, président de l'Académie des technologies : Carbios est l'exemple de ce que la science, la technologie et l'environnement étatique peuvent permettre de faire. C'est passionnant.

Mots clés : Carbios, déchet plastique, enzyme, Indorama, Novozymes, PET, PLA, recyclage biologique

Citation : Alain Marty & Michael Matlosz. (2023). *Les enzymes : une solution élégante à la fin de vie des plastiques.* Les soirées de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions des séances thématiques de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. academie-technologies.fr
Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Denis Ranque. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteur : Marie-Claude Treglia. n° ISSN : en attente.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.