

Juillet  
2013

*Actes du colloque*

## RECHERCHES BIO-INSPIRÉES

Une opportunité  
pour la transition  
écologique ?



COLLOQUE

10 décembre 2012

Muséum national d'Histoire naturelle



Muséum  
national  
d'Histoire  
naturelle



Liberté • Égalité • Fraternité  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Ministère  
de l'Écologie,  
du Développement  
durable  
et de l'Énergie

**Collection « Références » de la Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)**

**Directeur de la publication :** Laurent Tapadinhas

**Auteur(s) :** Vincent Artero (CEA), Paul Baduel (Sanofi Chimie), Robert Barbault (MNHN), Gilles Boeuf (MNHN), Francis Carré (Sanofi Chimie), Jérôme Casas (Université de Tours), Daniel Curulla-Ferré (Total), Philippe Doublet (Renault), Dominique Dron (CGEIET), Claude Grison (Université de Montpellier 2), Charles Hervé-Gruyer (Ferme du Bec Hellouin), George Jeronimidis (University of Reading), François Léger (AgroParisTech), Philippe Mackiewicz (Sanofi Chimie), Philippe Pouchin (Château Bas, Provence).

**Coordination éditoriale** Claire Hubert (DRI) et Thibault Prévost (DRI) sur la base d'une synthèse de la société Ubiquis.

**Conception du visuel du colloque et mise en page** Dicom MEDDE

**Crédit photos** Bernard Suard / MEDDE

**Date de publication :** Juillet 2013

Ce document n'engage que ses auteurs et non les institutions auxquelles ils appartiennent. L'objet de cette diffusion est de stimuler le débat et d'appeler des commentaires et des critiques.

## Sommaire

• Ouverture du colloque.....	3
• Photosynthèse artificielle : une réponse bio-inspirée pour la transition énergétique.....	5
• Biomimétisme inspiré des plantes et des insectes : de la science des matériaux aux micro-senseurs.....	8
• Chimie éco-inspirée : la nature, des hommes, des solutions vertes.....	12
• Re-naturer l'agriculture.....	16
• Table-ronde n°1 : Quelles recherches bio-inspirées pour la transition écologique ?.....	21
• Table ronde n°2 : Biomimétisme et société.....	23
• Clôture du colloque.....	27
• Exposition « posters ».....	29

### LE COLLOQUE EN VIDEOS

Retrouvez les grandes séquences du colloque filmées par les équipes du Muséum national d'Histoire naturelle sur le site du ministère, à l'adresse suivante : [www.developpement-durable.gouv.fr/colloque-recherches-bio-inspirees.html](http://www.developpement-durable.gouv.fr/colloque-recherches-bio-inspirees.html)



## Ouverture du colloque

### Gilles Boeuf, président du Muséum national d'histoire naturelle



Le colloque qui nous réunit aujourd'hui dans le grand amphithéâtre du Muséum national d'Histoire naturelle ravive une thématique – la bio-inspiration ou le biomimétisme – chère à cet établissement, qui a consacré au sujet quatre expositions depuis les années 1960. Je suis heureux que nous puissions, dans le sillage de ces actions et sous l'impulsion du Ministère du Développement durable, vous proposer aujourd'hui d'approfondir la réflexion scientifique, technique et même philosophique sur ces approches bio-inspirées pour en permettre une plus large appropriation par nos communautés de chercheurs et d'ingénieurs.

Les quatre exposés de ce matin, au cours desquels interviendront en tandem chercheurs et industriels, ouvriront, je l'espère, des perspectives de recherche et développement stimulantes dans quelques disciplines clés comme celles de la physique, de la mécanique et des sciences des matériaux, de la chimie et de l'agronomie. Les deux tables rondes de l'après-midi mettront en lumière l'intérêt, le potentiel et les limites de ces approches.

Rappelons que le biomimétisme ou la biomimétique n'est pas l'exact équivalent du terme anglais « biomimicry ». L'approche biomimétique couvre un champ plus vaste. Prenant pour support d'analyse le monde vivant, elle traduit, par un effort d'abstraction, les modèles biologiques analysés en concepts techniques ou développements industriels. Il s'agit donc par construction d'une démarche interdisciplinaire sollicitant sciences fondamentales et sciences de l'ingénieur. Cette démarche n'est pas une nouvelle science mais plutôt une méthodologie ou une approche transversale, applicable dans nombre de domaines scientifiques et techniques et susceptible d'apporter des « réponses » aux questions techniques ou organisationnelles que l'on se pose pour ou hors du vivant.

Le potentiel offert par le monde vivant est immense. L'extraordinaire diversité qui le caractérise en fait un « réservoir à idées » unique pour nos chercheurs et nos ingénieurs. On connaît, sur les continents, un peu plus de 1,7 million d'espèces, et 300 000 espèces ont été recensées dans les océans, tout ceci né d'une géo-diversité antérieure longue de quelque 700 millions d'années, avant

l'apparition de la vie il y a 3,85 milliards d'années. Quelle extraordinaire diversité de sujets d'analyse possibles ! L'écosystème corallien de la Calédonie en est peut-être l'une des illustrations les plus frappantes. Les exemples offerts par l'homme ne sont pas moins abondants. L'intestin de l'enfant se fait contaminer à la naissance par les bactéries du tractus génital de la mère et met quelque deux années à stabiliser sa flore. Sur les quelque mille espèces de bactéries présentes dans l'intestin, seules 480 sont connues aujourd'hui. Voilà qui ouvre encore des perspectives de recherche passionnantes au cœur même de l'homme.

Quand on parle de bio-inspiration, il est important de rappeler l'étonnante résilience du monde vivant, résilience dont on gagnerait sans doute à s'inspirer davantage. Ce vivant a traversé pas moins de cinq crises majeures au cours des 600 derniers millions d'années. La crise Permien-Trias, par exemple, survenue il y a 245 millions d'années, a vu l'extinction de près de 96 % des espèces. La vie a pourtant « résisté » à ces moments dramatiques ; elle s'est adaptée et a développé des « solutions » étonnantes passées au crible de l'évolution. Les tardigrades, par exemple, peuvent perdre leur tête et leurs pattes sous l'effet de la chaleur ou de la dessiccation et recouvrer leur vitalité au rétablissement de conditions plus clémentes. Les nématodes ou les œufs de papillon sont capables de supporter des situations de stress environnemental intenses. Ces capacités d'adaptation du vivant sont tout à fait exceptionnelles.

Un prix Nobel de chimie a proposé le terme d'anthropocène pour définir l'époque de l'histoire de la Terre durant laquelle le plus puissant moteur de l'évolution est le fait d'une espèce parmi les deux millions d'espèces connues : l'*Homo sapiens*. Une question à ce sujet était posée dans *Nature* en mars 2011 : sommes-nous en train de créer les conditions de la sixième grande crise d'extinction, du fait de la destruction et de la pollution des milieux naturels, de la surexploitation des stocks, de la dissémination anarchique d'espèces invasives (en Méditerranée par exemple) et des multiples activités humaines concourant au changement climatique ? Les émissions de dioxyde de carbone acidifient l'océan à une vitesse et dans des proportions inquiétantes. Son pH s'est maintenu autour de 8,18 pendant près de cent millions d'années, il est descendu à 8,08 au cours des trente dernières années. Cela correspond à une augmentation d'acidité de 30% en 30 ans. On estime qu'il sera à moins

de 8 à la fin du siècle. Le vivant est-il prêt à affronter ces changements ? Va-t-on porter des dommages irrémediables à ce formidable « vivier », source d'inspiration pour l'homme ?

Les exemples de molécules extraites du vivant et utilisées comme anti-cancéreux, antibiotiques, antiviraux, anti-champignons abondent... Pour le milieu marin, les éponges produisent à elles seules plus de 30% de ces produits. On estime à quelque 22 000 le nombre de produits d'intérêt pharmacologique ou cosmétique déjà extirpés de l'océan. Pas moins de treize prix Nobel de médecine ont été obtenus à partir de modèles aquatiques. Ainsi, Metchnikoff découvre la phagocytose grâce à l'étoile de mer ; Charles Richet l'anaphylaxie grâce à la méduse ; Andrew Huxley et Alan Hodgkin, la transmission de l'influx nerveux grâce à l'axone de calmar... Otto von Warburg travaille sur l'oursin ; Eric Kandel découvre les bases moléculaires de la mémoire grâce à la limace de mer ; Timothy Hunt, les molécules clés impliquées dans le développement des cancers

(cycline et kinase) grâce à l'étoile de mer ; O. Shimomura, la protéine fluorescente verte de méduse ; Szostak, Blackburn et Greider obtiennent le prix Nobel de médecine en 2009 pour leurs travaux sur le vieillissement et sur les enzymes télomérases.

Il y a deux ans, nous avons organisé un colloque posant la question « L'humain peut-il s'adapter à lui-même ? ». Sri Aurobindo nous disait dès 1915 que l'homme ne pouvait plus supporter le « *développement gigantesque de la vie extérieure sans un changement intérieur : si l'humanité voulait survivre, une transformation radicale de la nature humaine était indispensable* ».

C'est ce à quoi nous invite en quelque sorte la démarche biomimétique en recherche et développement. Nous réapproprier le monde du vivant. Nous inspirer des formes, des relations, des mécanismes offerts par son « génie ». C'est une démarche qui suppose humilité, maintien de l'harmonie, partage et respect.

## Photosynthèse artificielle : une réponse bio-inspirée pour la transition énergétique

Vincent ARTERO, Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives

Le laboratoire de chimie et de biologie des métaux (LCBM) est un laboratoire de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, du CNRS et du CEA. Il s'intéresse aux recherches bio-inspirées.

A l'heure actuelle, nous consommons au niveau mondial quelque 17 TJ par seconde (1 TJ = 1000 milliards de joules), dont 80 % proviennent des énergies fossiles. D'ici à 2050, malgré les efforts d'économie d'énergie, la production annuelle d'énergie doublera en conséquence de l'élévation du niveau de vie et du nombre d'habitants sur la planète. Les carburants fossiles n'augmenteront probablement pas dans la même proportion ; d'autres ressources énergétiques sont indispensables. Cette ressource peut être, doit être, l'énergie solaire. Le soleil envoie en effet sur la Terre, en une heure, l'énergie consommée au niveau mondial en un an, soit 120 000 TW. La moyenne annuelle de production d'énergie par photosynthèse s'élève à 125 TW.

L'énergie solaire est diluée, avec 170 W par mètre carré, et elle est intermittente. Il convient donc à la fois de la concentrer et de la stocker. Dans ce contexte, il faut noter qu'une batterie Lithium-ion peut stocker entre 0,46 et 0,72 MJ par kilogramme, soit 100 fois moins que l'essence et 300 fois moins que l'hydrogène. Actuellement, la consommation d'énergie se fait à 83 % sous forme de carburants et 17 % sous forme d'électricité. Les processus alternatifs de production d'énergie génèrent quasiment tous de l'électricité mais nous ne savons pas stocker cette électricité de manière durable, propre et stable dans le temps. Deux moyens permettent de stocker l'énergie solaire sous forme de carburants. D'une part, la valorisation du dioxyde de carbone, soit provenant d'émission massive, soit à plus long terme atmosphérique, peut permettre de produire des carburants liquides. Le réseau de distribution est déjà en place et les moteurs sont adaptés mais la chimie est actuellement assez peu efficace et sélective pour transformer le dioxyde de carbone. L'autre possibilité consiste à électrolyser l'eau, voire directement à photolyser l'eau pour produire de l'hydrogène. Ceci offre l'avantage de proposer un système complètement cyclique. L'énergie renouvelable, par exemple solaire via des panneaux photovoltaïques, est utilisée pour décomposer l'eau en hydrogène, stocké, et en oxygène, relâché. L'hydrogène stocké est alors recombinaison, au moment souhaité, avec de l'oxygène atmosphérique,

pour produire de l'électricité au sein d'une pile à combustible. Selon le prospectiviste Jeremy Rifkin, l'hydrogène amènera la troisième révolution industrielle. Chacun pourra alors être à la fois producteur et consommateur d'énergie renouvelable, voire distributeur de cette énergie à ses plus proches voisins.

La nature sait, depuis 3,8 milliards d'années, utiliser l'énergie solaire pour produire les « carburants » dont elle a besoin, via la photosynthèse. Chez les plantes, des photosystèmes contiennent les chlorophylles où les photons sont absorbés, formant d'une part un électron et d'autre part une lacune électronique (aussi appelé « trou »). L'électron ainsi photogénéré est, à l'issue de la chaîne photosynthétique, transmis à un système enzymatique qui l'utilise pour produire le NADPH, forme masquée de la molécule d'hydrogène dans la nature. Ce réducteur transforme ensuite, au niveau du cycle de Calvin, le dioxyde de carbone en biomasse et autres molécules énergétiques qui forment le « carburant » de la cellule. Les lacunes électroniques formées au niveau de la chlorophylle sont transférées à un agrégat métallique, à base de calcium et de manganèse, qui sera capable d'oxyder l'eau et de produire l'oxygène. Chez certaines micro-algues, l'électron photogénéré est transféré à une enzyme hydrogénase, capable de réduire l'eau pour produire directement l'hydrogène.

Le processus photosynthétique peut être décomposé en deux étapes. La première concerne la capture de la lumière et la séparation de charges et a constitué une source d'inspiration pour les nouvelles générations de cellules photovoltaïques, notamment les cellules photovoltaïques organiques, et les cellules de Grätzel qui utilisent des colorants moléculaires pour capter l'énergie solaire. La seconde étape consiste à utiliser les charges générées lors de la première pour conduire des réactions chimiques. C'est là qu'entrent en jeu les enzymes (catalyseurs du monde vivant) qui exploitent les électrons et les lacunes photogénérés pour produire de l'oxygène et de l'hydrogène. Les enzymes fonctionnent avec de très bons rendements énergétiques et à grande vitesse. Fait remarquable, elles ne contiennent que des métaux abondants alors que, pour faire de la catalyse efficace, les chimistes sont obligés d'utiliser des métaux nobles, comme le platine, l'iridium, le palladium, le rhodium ou le ruthénium. Ces métaux nobles sont très efficaces et très

résistants à la corrosion ; ils sont toutefois rares et chers. L'utilisation du platine n'est économiquement viable, pour des applications « hydrogène », que si l'on diminue la quantité nécessaire au minimum par 10. Ce modèle ne serait toutefois pas durablement viable puisqu'on ne sait extraire que 200 tonnes de platine par an et que, pour remplacer tous les moteurs à combustion par des piles à combustible à base de platine, il faudrait 75 ans d'extraction minière, immobilisant du même coup le tiers de la ressource totale mondiale.

Les enzymes hydrogénases peuvent constituer une alternative au platine. Leur site actif à base de fer et/ou de nickel est optimisé. Il est interconnecté avec un réseau d'agrégats fer/soufre qui transportent les électrons nécessaires et un réseau de liaisons hydrogènes qui permet aux protons d'atteindre le site actif ou de s'en échapper. Enfin, un canal permet aux molécules de gaz de s'échapper du site actif où elles sont produites. Ces enzymes, absorbées sur des électrodes de graphite, présentent une réponse électrochimique réversible, attestant que l'enzyme peut fonctionner dans un sens comme dans l'autre, caractéristique que l'on ne retrouve qu'avec les métaux nobles comme le platine. Dans certaines conditions, l'hydrogénase peut rivaliser avec le platine en termes de performances catalytiques. S'inspirer de la structure de ce site actif est donc une solution pour élaborer des catalyseurs alternatifs s'affranchissant des métaux nobles. D'autres enzymes sont des sources d'inspiration pour le chimiste désireux d'élaborer des catalyseurs alternatifs pour la photosynthèse artificielle : l'agrégat calcium-manganèse du photosystème, à même d'oxyder l'eau, l'autre réaction importante pour l'électrolyse et la photolyse de l'eau ; la CO-déshydrogénase ou la formiate-réductase, capables de convertir le dioxyde de carbone en acide formique ou en monoxyde de carbone, premiers maillons pour la production de carburants liquides.

Revenons à l'enzyme hydrogénase : après avoir examiné la structure de son site actif et isolé les éléments pertinents à son activité, en l'occurrence l'atome de nickel lié à l'atome de fer par deux ponts soufrés, le chimiste peut reproduire ces éléments structuraux dans une molécule synthétique. Une fois cette molécule synthétisée, son activité est testée pour réduire des protons. [Un extrait du film réalisé par Matthieu Chauvin](#) montre comment l'introduction du catalyseur déclenche le dégagement de bulles d'hydrogène à proximité d'un barreau de carbone alimenté en courant électrique. Le catalyseur, en acceptant un électron du barreau, lie un proton et forme un hydrure. Un second électron permet au catalyseur de lier un deuxième proton et de former une molécule d'hydrogène.

Une fois le catalyseur élaboré, il s'agit de savoir s'il peut être utilisé dans des dispositifs technologiques. Le catalyseur est alors greffé sur un nanotube de carbone, excellent conducteur électronique. Utilisé dans des conditions technologiques, cet assemblage nanotubes de carbone / catalyseur est déposé sur une couche poreuse constituée de fibres de carbone permettant à la fois la diffusion du gaz hydrogène et des électrons. Une membrane de Nafion, qui permet aux protons produits par l'autre électrode d'atteindre le catalyseur, est assemblée. Dans ces conditions, ce nouveau matériau bio-inspiré peut, de manière réversible, soit produire de l'hydrogène (réaction à l'œuvre dans un électrolyseur) soit l'oxyder (réaction requise pour un fonctionnement pile à combustible). Une telle propriété, exceptionnelle, n'avait été observée que pour les hydrogénases ou les métaux nobles comme le platine. Ce matériau, le premier donc sans métaux nobles, est en outre compatible avec la technologie Nafion et il est très stable. Plus de 100 000 cycles catalytiques peuvent être réalisés en 10 heures par chaque centre bio-inspiré greffé sur les nanotubes de carbone. Ce catalyseur peut, en outre, fonctionner en présence de monoxyde de carbone, polluant souvent présent dans l'hydrogène produit à partir de biomasse et poison irréversible du platine utilisé actuellement dans les piles à combustible. A partir de ces catalyseurs sans métaux nobles, des photo-catalyseurs peuvent être produits en couplant ces catalyseurs à des photo-sensibilisateurs. Sous irradiation visible, ces photocatalyseurs stockent l'énergie solaire en produisant de l'hydrogène. La suite logique des travaux consistera à immobiliser les photo-catalyseurs sur des électrodes. Le développement de telles photocathodes à base de photocatalyseurs moléculaires est au centre d'un projet financé par l'« European Research Council ». Une collaboration entre le LCBM et le Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris a d'ores et déjà permis de développer des matériaux de photo-oxydation de l'eau à base d'oxyde de fer, un semi-conducteur peu coûteux combiné avec des oxydes de cobalt.

A terme, il s'agit bien sûr de développer un dispositif complet combinant photoélectrode pour la production d'hydrogène et photoélectrode d'oxydation de l'eau. De tels dispositifs sont souvent appelés feuilles artificielles et les premiers prototypes ont une quinzaine d'années. Toutefois ces assemblages posent problème car ils sont élaborés à partir de triples jonctions photovoltaïques à la fois très coûteuses et peu stables dans des conditions alcalines. Là encore, l'utilisation de matériaux moins coûteux et plus stables est préférable. Un projet collaboratif sera développé entre Total, le LCBM et le Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris en collaboration avec Clément Sanchez, professeur au Collège de France, et Christel Laberty-Robert, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie.

## Daniel CURULLA-FERRÉ, TOTAL

Total est particulièrement intéressé par les recherches menées au CEA et au Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris qui permettraient de produire du « carburant » à partir d'une énergie renouvelable comme l'énergie solaire. L'hydrogène est un élément chimique qui n'existe pas de manière isolée dans la nature : il se trouve sous forme d'eau, de produits pétroliers ou de molécules organiques ou biochimiques. L'industrie s'intéresse actuellement à la production d'hydrogène non carbonée. Ces processus sont étudiés chez Total. Si cela doit être utilisé à l'échelle des produits pétroliers, les quantités de dioxyde de carbone émises seront importantes. Il conviendra donc d'être très attentif à cette voie de production de l'hydrogène si l'on veut qu'elle soit soutenable.

L'hydrogène est déjà largement utilisé dans l'industrie. Les raffineries et les usines de production d'ammoniac pour la fabrication des engrais sont les principaux consommateurs d'hydrogène. Leurs besoins vont croissant. Un enjeu important concerne les biocarburants ou le biodiesel dont le traitement requiert également de l'hydrogène car ils contiennent des doubles liaisons qui doivent être hydrogénées ou un contenu élevé en atomes d'oxygène qui doit être enlevé.

Avant de produire, nous devons veiller aux coûts, afin que les consommateurs soient prêts à payer la facture énergétique associée. Actuellement, Total utilise de l'hydrogène qui provient de carburants fossiles, notamment du gaz naturel. Sachant que la synthèse d'une

tonne d'hydrogène produit dix tonnes de dioxyde de carbone, l'utilisation d'hydrogène représente l'un des facteurs les plus importants d'émissions de dioxyde de carbone du Groupe.

L'hydrogène peut provenir de l'énergie solaire ou éolienne grâce à l'électrolyse via la production d'électricité. Il faut alors produire cette électricité et la transporter avant de l'utiliser pour produire l'hydrogène. Or, chaque étape induit une perte d'efficacité et les pertes s'élèvent au final à 70 %. Les travaux sur la photosynthèse artificielle pourraient fournir à terme de l'hydrogène propre.

Pour progresser plus rapidement dans ces recherches, Total instaure des partenariats académiques et évalue la viabilité scientifique et économique des approches développées. Nous utilisons actuellement l'énergie solaire pour fabriquer de l'électricité mais ne savons évidemment pas transformer l'eau en hydrogène de manière directe. Il s'agit d'un verrou scientifique considérable que les équipes de chercheurs pourraient nous aider à lever.

Total est déjà un partenaire actif de la production d'hydrogène propre et non carbonée, surtout au sein de la filière allemande. Nous travaillons en partenariat avec d'autres industries sur ces sujets. Néanmoins, le premier objectif recherché est de consommer significativement moins d'énergie. Total est prêt à s'engager afin d'améliorer l'efficacité énergétique de toutes ses opérations dans le monde.

### De la salle

Vous avez parlé de production d'énergie mais pas de stockage. Quelles sont les innovations sur ce sujet très problématique ?

#### Daniel CURULLA-FERRÉ

Total teste, en Allemagne, le stockage sous haute pression.

#### Vincent ARTERO

Le problème du stockage se pose sous deux voies : le stockage d'hydrogène pour les applications mobiles et le stockage pour les applications stationnaires. Il existe aujourd'hui des solutions. Par exemple, la PME McPhy Energy, installée dans la Drôme, exploite un brevet du CNRS basé sur l'hydrure de magnésium. Cette société vend des containers permettant un stockage qui donne de l'autonomie aux maisons et sites isolés.

### De la salle

Au niveau des infrastructures de transport, l'une des principales critiques adressée à l'encontre de l'hydrogène tient à sa capacité énergétique volumique. Il est possible de compresser de l'hydrogène mais cela requiert d'importantes dépenses énergétiques. Par ailleurs, le transport type gazoduc demanderait des technologies de forgeage de métaux extrêmement importantes pour éviter toute fuite d'hydrogène à travers les tuyaux.

#### Vincent ARTERO

Il existe un réseau de gazoduc à hydrogène entre la France, les Pays-Bas et la Belgique qui relie toutes les raffineries qui ont besoin d'hydrogène. Les réservoirs à hydrogène sont plus sûrs que les réservoirs à GPL puisque l'éventuelle explosion est contrôlée. Ces réservoirs sont en cours d'homologation. L'hydrogène liquide ou extrêmement comprimé a une rentabilité énergétique qui n'est pas satisfaisante.

## Biomimétisme inspiré des plantes et des insectes : de la science des matériaux aux micro-senseurs

George JERONIMIDIS, University of Reading, Grande-Bretagne

La bio-inspiration ou le biomimétisme est un sujet sur lequel je travaille depuis longtemps. La France a toujours été un peu en retard dans ce domaine. Je me réjouis donc de ce colloque.

Je vous parlerai aujourd'hui de bio-inspiration du monde des plantes et plus précisément de celle des systèmes fibreux, matériaux dont la biologie a besoin pour fonctionner. Les fibres constituent 95 à 98 % de la matière vivante. Les interactions entre géométrie et fibres sont très importantes.



Pavillon « One Ocean » de l'EXPO 2012 Yeosu  
(Crédits : soma architecture)

Au sein du vivant, il existe de nombreuses architectures de fibres, avec trois composantes chimiques fondamentales : les polysaccharides de la cellulose, les protéines pour les fibres du monde animal et la chitine pour le monde des insectes et des arthropodes. Le rôle des fibres consiste à créer des architectures et des formes géométriques. La biologie exploite l'anisotropie, l'hétérogénéité et les hiérarchies que donnent les fibres.

Le « Bionic Prize » 2012 a été remis à une équipe multidisciplinaire composée d'ingénieurs-architectes de Stuttgart, de biologistes de Freiburg et d'ingénieurs travaillant dans une entreprise de textiles composites. Cette équipe est partie de l'observation du *strelizia regina*, fleur qui interagit avec l'oiseau. Le poids de l'oiseau fait fléchir une poutre et cette flexion amène l'ouverture du système renfermant le pollen. Ce système mécanique repose sur un couplage entre flexion et torsion. Le système est passif. Dans le prototype bio-inspiré réalisé par l'équipe, le rayonnement solaire induit un changement de longueur de l'élément (extension thermique) et la poutre fléchit en fonction de cet élément thermique. Ce système permet de contrôler

passivement la lumière à l'intérieur d'un bâtiment. Lorsqu'il faut concevoir le prototype à échelle humaine, et donc passer de l'échelle biologique à l'échelle physique, la question de la faisabilité doit toujours se poser. Dans le pavillon conçu pour l'exposition 2012 en Corée du Sud, tous les éléments peuvent changer de direction par rapport au soleil. L'échelle et les matériaux ont été modifiés mais le concept de base est le même.

Un autre projet s'inspire des pommes de pin qui s'ouvrent pour libérer les graines. Le système fonctionne de manière réversible. Le changement d'humidité amène des changements de dimension. L'anatomie interne du système montre deux couches de cellules : une couche avec des fibres de cellulose orientées dans l'axe des cellules et une couche inférieure où la cellulose est implantée dans l'autre sens. Les variations d'humidité ont pour conséquence de générer une courbure du matériau. Traduit en système technologique, ce système a été appliqué à un textile adaptatif répondant à des gradients d'humidité. Il a également été exploité dans des bâtiments afin de libérer, automatiquement et sans énergie supplémentaire, l'humidité dans une salle.

Le même principe s'observe pour certains arbres affectés par des glissements de terrain. Ceux-ci parviennent à se redresser progressivement en synthétisant une couche supplémentaire de fibres et en changeant localement leur organisation. Ce mécanisme a été exploité par des architectes ingénieurs pour concevoir une poutre portante, une poutre à courbure variable, qui réagit à la lumière et s'adapte à des conditions particulières. Ils se servent de bois de tension et de bois normal. Un projet vise à fabriquer une structure portante pour un bâtiment.

Le dernier exemple concerne les agencements mécaniques au sein d'un tronc d'arbre et de ses embranchements qui dévoilent l'importance d'exploiter l'organisation des fibres en vue de minimiser les contraintes. La forme peut être utilisée pour faire des transitions plus douces. L'optimisation par géométrie montre des sur-contraintes alors que, dans une vraie branche d'arbre, les contraintes disparaissent. Il y a donc une discontinuité géométrique qui ne se traduit pas par une discontinuité mécanique.

En conclusion, la biologie offre toute une gamme de solutions qui peuvent contribuer directement ou indirectement à répondre aux problématiques de

développement durable : des matériaux performants et des structures efficaces, des processus de fabrication à température ambiante et en milieu aqueux, des bilans énergétiques (capture, transformation, utilisation et recyclage) et des réponses passives qui utilisent l'énergie ambiante sans avoir besoin de la stocker.

Deux revues internationales traitent de ces sujets ainsi qu'un réseau international et des programmes de recherche et de développement initiés aux Etats-Unis, en Allemagne, en Europe, avec l'Agence spatiale européenne, et en Chine.

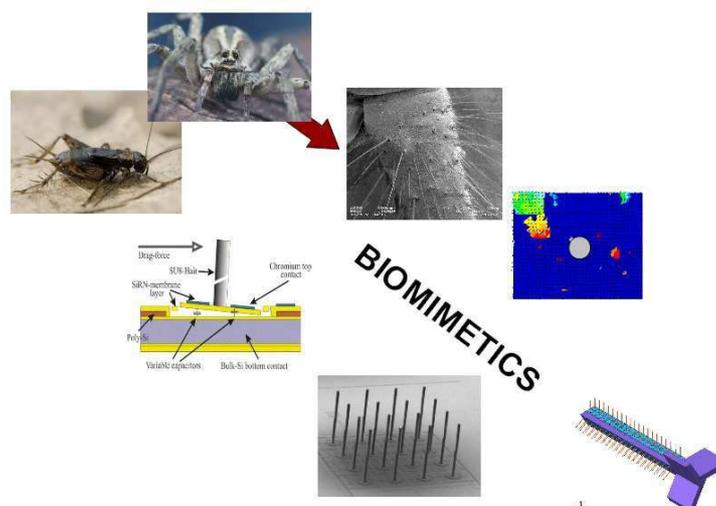
## Jérôme CASAS, Université de Tours

Certains insectes (blattes, grillons...) ont deux appendices à la fin de leur corps où se trouvent de nombreux capteurs, poils filiformes dont le but premier est de mesurer les flux d'air les plus infimes. Ces capteurs sont les meilleurs mécano-senseurs du règne animal puisqu'ils sont sensibles à une énergie équivalente à celle d'un dixième de photon, soit à des fluctuations proches du bruit thermique. Ceci pose deux questions : aux biologistes d'une part qui se demandent ce qui, dans la vie de l'animal, justifie l'emploi de senseurs aussi performants et aux technologues d'autre part, incapables aujourd'hui de concevoir des instruments de mesure aussi performants à de si petites échelles, qui s'interrogent sur leur fonctionnement en vue d'élaborer des systèmes micro-électroniques aux propriétés comparables.

Les poils sont composés de chaussettes, faites de plusieurs lamelles. Le seul mouvement du poil pince la tête d'un neurone et génère une impulsion nerveuse. A la base du poil, des mécano-senseurs mesurent les déflexions de la cuticule. Ce système couplé dispose donc de deux senseurs qui travaillent différemment et de manière complémentaire.

Les ingénieurs ont imaginé des poils pour mesurer les vitesses de flux. Les MEMS senseurs des années 2000 n'étaient pas fonctionnels. Un MEMS assez complexe a été élaboré et un premier prototype a été conçu. Une « brosse à dents » vise à étudier les interactions hydrodynamiques entre les poils. Des poils d'un millimètre de long ont été fabriqués, avec une seconde couche. La différence entre les poils de grillon et leur équivalent technologique était initialement d'un contre 10 000, le poil technologique étant 10 000 fois moins sensible que le poil biologique. Nous sommes aujourd'hui à un contre 10 après dix ans de recherche et dix millions d'euros investis. Le poil ne bouge pas mais se trouve sur une plaque très sensible. Il est possible de créer des forêts de poils différents et de faire varier les distances entre poils pour comprendre le fonctionnement de canopées de poils assez denses, comme ont souvent les insectes.

Si l'on veut appréhender pourquoi cet insecte est doté d'un système aussi performant, il faut faire de l'écologie et comprendre les forces évolutives (prédation, relations sexuelles etc). Pour le grillon des bois, la principale menace provient d'un groupe d'araignées se déplaçant avec célérité.



*Des poils de blattes aux micro-capteurs*

La plupart des études aérodynamiques ne portent pas sur l'air déplacé par une araignée qui court. Il a donc fallu étudier cet aspect par des méthodes de mécanique des fluides. Les araignées qui courent vite génèrent un déplacement d'air devant elles, provoquant des poches transitoires dont le signal est perçu par le grillon. Avec ces senseurs, le grillon sent l'araignée cinq centimètres avant qu'elle ne l'atteigne, ce qui lui permet de fuir. En termes de technologie, l'équipe de Twente désire construire des caméras de flux MEMS qui cartographient en deux dimensions la dynamique de fluides à une échelle microscopique. La présence d'ingénieurs et de biologistes est indispensable dans ces programmes de recherche qui touchent à la morphologie fonctionnelle, à la mécanique des micro-fluides, aux connaissances des espèces.

L'Allemagne est leader en biomimétisme en Europe. Les groupes de recherche y sont généralement financés à hauteur d'un à trois millions d'euros pendant cinq ans. A titre de comparaison, en France, seul le CNRS a financé un groupe de recherche (RTP) bionique à hauteur de 15 000 euros la première année puis 10 000 euros les deuxième et troisième années. Au niveau national, l'Allemagne compte de nombreux instituts techniques et universitaires qui s'intéressent à la biomimétique, notamment à Berlin avec le « Biokon international », fédération de sociétés bioniques européennes présidée par George Jeronimidis. Une carte montre la feuille de route dont s'est dotée l'Allemagne pour le biomimétisme. Elle fait apparaître que les publications scientifiques et les brevets croissent de manière significative. Lorsque les capacités d'un organisme de recherche viennent à tarir, celui-ci passe la main à un

autre, ce qui permet d'assurer une continuité sur quelque vingt ans de financements non négligeables. En outre, les principaux appels d'offres ne durent pas trois mais cinq ans. Des congrès, davantage à visée industrielle que scientifique, sont régulièrement organisés. Le nombre d'universités allemandes dans lesquelles il est possible d'étudier la bionique est important, certaines proposant un cursus du L1 au M2. Il est fréquent qu'une petite entreprise de 150 salariés propose des bourses de thèse dans les congrès. Les Allemands estiment que certaines conditions doivent être remplies pour qu'ils puissent continuer sur leur lancée : l'interdisciplinarité ; la mise en place d'un « lobby » au niveau européen, qui s'avère complexe ; l'élaboration de normes type ISO ; un renforcement de l'articulation entre biomimétisme et développement durable avec la conservation de la biodiversité comme base d'inspiration pour le biomimétisme.

Une autre carte, élaborée par des Anglais, montre les expertises en France. L'ANR a constaté qu'aucune UMR française ne s'était approprié le biomimétisme au point d'en faire son titre et que les équipes abordant la thématique étaient trop peu structurées pour qu'un appel d'offres avec un taux de succès de 20 % puisse être lancé.

Le biomimétisme, tel que présenté ici, a pour fondamentaux la physique du solide et la physique du fluide. Une définition plus large pourrait intégrer la chimie, les sciences de l'algorithme et l'agriculture, et permettrait d'élargir le champ.

## Philippe DOUBLET, Renault

### Renault et le biomimétisme : une démarche nouvelle pour produire des innovations de rupture

Je suis ingénieur, en charge des stratégies techniques pour réduire les émissions de dioxyde de carbone. Renault a lancé une recherche sur la bio-inspiration pour des applications relatives aux véhicules décarbonés, recherche dont Camila Freitas-Salgueiredo a la charge, en collaboration avec le LIVIC, laboratoire Interactions Véhicules-Infrastructures-Conducteurs, et l'ISIR, laboratoire de l'Université Pierre et Marie Curie qui travaille sur la robotique. Mon exposé vise à vous expliquer pourquoi une entreprise industrielle comme la mienne s'intéresse aux recherches en biomimétisme.

L'automobile s'est développée jusqu'à présent sans contraintes. Elle rencontre aujourd'hui deux problèmes majeurs. Le premier touche à l'environnement et à la

santé, la majorité des automobiles fonctionnant avec des hydrocarbures qui émettent du dioxyde de carbone et des gaz nocifs. Ces tendances d'émission risquent de s'accroître dans les prochaines décennies, avec un parc automobile mondial en forte croissance et une concentration de véhicules en milieu urbain toujours plus importante. Les impacts sur la santé pourraient devenir très significatifs. Le second problème touche à la rareté prévisible des carburants fossiles pour lesquels une baisse des ressources est attendue à relativement court terme. De ce fait, le coût de l'énergie augmentera et deviendra insupportable pour beaucoup d'utilisateurs comme pour les économies qui en dépendent.

La feuille de route publiée en 2011 par la Commission européenne pour une « économie compétitive à faible intensité de carbone à l'horizon 2050 » vise à réduire de manière significative les impacts environnementaux de l'automobile au niveau européen. Si l'on suppose que les tendances impulsées par les normes de consommation automobiles actuelles (e.g. CAFE) sont extrapolables jusqu'en 2050, alors la consommation de carburants fossiles devra diminuer d'un facteur 3 à l'horizon 2030 et d'un facteur 10 à l'horizon 2050. Cela signifie que de 6 litres d'essence consommés aujourd'hui en moyenne aux 100 kilomètres, on devra passer à deux litres en 2030 et à moins d'un litre en 2050. Dans le même temps, l'accès aux centres villes, voire aux zones urbaines, sera progressivement interdit aux véhicules produisant des émissions de gaz. Les solutions techniques traditionnelles, même optimisées, ne pourront pas atteindre ces objectifs. Des ruptures technologiques apparaissent absolument nécessaires pour que l'automobile survive à terme et reste synonyme de progrès pour l'homme.

Les ingénieurs s'inspirent peu de l'exemple de la nature qui a pourtant mis en place, depuis plus de trois milliards d'années, des stratégies de survie remarquables. La nature utilise l'énergie de manière proportionnée, recycle tout et fait appel à une chimie généralement respectueuse de la vie. Cette source d'inspiration a suscité une envie d'aller plus loin sur le sujet.

Il existe de nombreux modèles dans la nature qu'il serait pertinent d'étudier et éventuellement de transposer à l'automobile. Par exemple, les bancs de poissons changent de direction et de vitesse avec une grande facilité, sans jamais que les poissons ne se percutent au sein d'un banc. Si nous comprenions les modes de fonctionnement de ces déplacements groupés, nous pourrions en tirer des enseignements précieux pour l'automobile. Les poissons semblent avoir une intelligence collective supérieure à celle des humains puisqu'ils parviennent à gérer ces situations avec moins d'énergie et sans collision. La reproduction de ces mécanismes permettrait de réduire,

voire de supprimer, les embouteillages et les collisions. Certaines voitures peuvent déjà se déplacer de manière totalement autonome d'un point A à un point B dans la circulation. On pourrait imaginer un parc de véhicules fonctionnant de la sorte, doté d'une « intelligence collective », avec peu d'équipements électroniques embarqués, à la manière des poissons. Les voitures pourraient alors rouler sur l'autoroute à quelques mètres de distance, en consommant moins tout en étant plus rapides.

Un autre exemple peut-être un peu plus anecdotique mais qui en dit long sur le vivier d'inspiration que constitue la nature : les baleines à bosse possèdent, sur leur nageoire, des excroissances qui participent de manière importante à l'efficacité hydrodynamique des nageoires et leur permettent de se déplacer en mobilisant moins d'énergie. Les bénéfices de ces excroissances sont maintenant compris et utilisés par des ventilateurs ou des éoliennes qui gagnent en efficacité énergétique. Il s'agit là d'un exemple de « solution » simple dont la reproduction, issue de l'observation de la nature, permet une amélioration des rendements industriels.

Nous travaillons sur d'autres phénomènes qu'il serait prématuré d'exposer ici. Si nous avons identifié des idées et des solutions pour améliorer l'efficacité énergétique des automobiles, la question plus fondamentale que nous nous posons a trait à l'organisation du travail entre ingénieurs et chercheurs du monde du vivant. Comment nous, ingénieurs, pouvons-nous mieux dialoguer avec les spécialistes du vivant ? Le modèle allemand apporte peut-être une partie de la réponse à cette question : structurer une communauté de chercheurs et de praticiens et formuler un cadre conceptuel dans un langage que les deux communautés puissent s'approprier. Il n'a jamais été plus pressant d'instaurer des passerelles entre le monde des chercheurs et celui des ingénieurs pour que de réels espaces collaboratifs suscitent des innovations de rupture, dans le domaine du biomimétisme notamment.

## Chimie éco-inspirée : la nature, des hommes, des solutions vertes

Claude GRISON, Université de Montpellier 2 – CEFE CNRS

Le concept de Chimie verte exprimé à travers le Réseau international GSCN, une vision plus globale et élargie à la chimie durable, la réglementation chimique européenne REACH, le rapport du MEEDDM paru le 23 mars 2010 et plaçant la chimie verte comme l'une des filières vertes d'avenir, l'élaboration d'un grand scénario de chimie écologique et durable par le Ministère de l'Industrie japonaise (le METI), sont les témoins d'une discipline en pleine mutation. Au cours de l'année 2011 déclarée année internationale de la chimie, la communauté scientifique a démontré qu'elle possédait les outils et la volonté de contribuer efficacement aux grands problèmes axés sur l'environnement, l'énergie, l'épuisement des ressources et la qualité de vie. Elle se propose notamment de contribuer efficacement à la réduction des déchets en développant des technologies vertes innovantes de réutilisation durable, d'allongement de durée de vie, de réduction des quantités, de remplacement et de diversification des matières premières de la discipline. L'un des piliers du concept de chimie verte est l'utilisation de systèmes catalytiques en remplacement de réactifs stœchiométriques. Un catalyseur de type non enzymatique est fréquemment un métal de transition noble ou primaire, une terre rare. En février 2010, le Pôle Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations Economiques a publié un rapport inquiétant sur la criticité des ressources non renouvelables au titre des réserves ou de la concentration de la production sur quelques pays. L'accès aux minéraux stratégiques et primaires est devenu crucial parce que leurs stocks disponibles s'amenuisent et aussi parce qu'ils sont détenus par un faible nombre de pays, souvent politiquement instables. Situés en amont des valeurs industrielles, les métaux de transition tels que (Rh, Pd, Ni, Zn, Cu, Cr, Mn, Co, etc.) sont essentiels à de nombreuses transformations chimiques. Les domaines de la chimie organique industrielle, de la pétrochimie, de l'agrochimie, des polymères, des plastiques, des textiles, des colorants, des peintures, des cosmétiques et parfums, des dérivés pharmaceutiques et des médicaments sont tous concernés. Face à l'encerclement chinois et sa politique de contrôle et de manipulation des prix des matières premières industrielles, l'Union européenne, et la France en particulier, doivent relever un défi majeur basé sur le développement de la compétence et l'innovation.

Le programme de recherche exposé s'inscrit totalement

dans ce cadre en proposant le développement avancé d'une nouvelle filière verte circulaire basée sur le recyclage de ressources minérales. L'objectif principal est de développer à l'échelle internationale un procédé innovant de valorisation chimique des technologies de phytoextraction destinées à remédier à l'accumulation des espèces métalliques dans les sols, consécutives aux exploitations minières intensives et aux activités industrielles métallurgiques.

Cette forte pollution des sols par les espèces métalliques est un problème très préoccupant car le sol exerce des fonctions essentielles qui déterminent en grande partie la production des produits alimentaires et la qualité de l'eau. De plus, les « éléments traces métalliques » (ou « ETM ») font partie des composés les plus nocifs et ne sont pas aisément biodégradables.

Au-delà des conséquences environnementales, les risques sur la santé sont réels : les atteintes des systèmes nerveux, rénal, pulmonaire ou des tissus osseux sont clairement établies. Des exemples récents de plombémies préoccupantes et de premier stade de saturnisme ont été mis en évidence chez des enfants habitant à proximité d'anciens sites miniers français.

Les impacts spécifiques aux pollutions métalliques ne sont pas seulement d'ordre environnemental et médical ; ils affectent directement le développement économique et touristique des zones concernées. L'excavation ou le confinement de zones contaminées ont été mis en place sur certains sites, mais ces techniques ne peuvent pas constituer des solutions satisfaisantes. Peu inspirées, mal acceptées, elles sont coûteuses et ne résolvent rien.

Il y a quelques années, il a été découvert l'existence de plantes rares, capables de se développer sur des sols désertiques car devenus phytotoxiques. Ces plantes ont développé progressivement des stratégies d'adaptation leur permettant de tolérer la pollution, voire d'extraire les éléments métalliques et de les stocker dans leurs parties aériennes comme pour mieux s'en protéger. Les quantités d'éléments métalliques trouvées dans les systèmes foliaires peuvent atteindre des niveaux impressionnants (jusqu'à 7-8% en masse sèche). On parle alors de phytoextraction. Il s'agit d'une écotecnologie de dépollution naturelle et partielle des sols et des sédiments par accumulation des ETM dans les

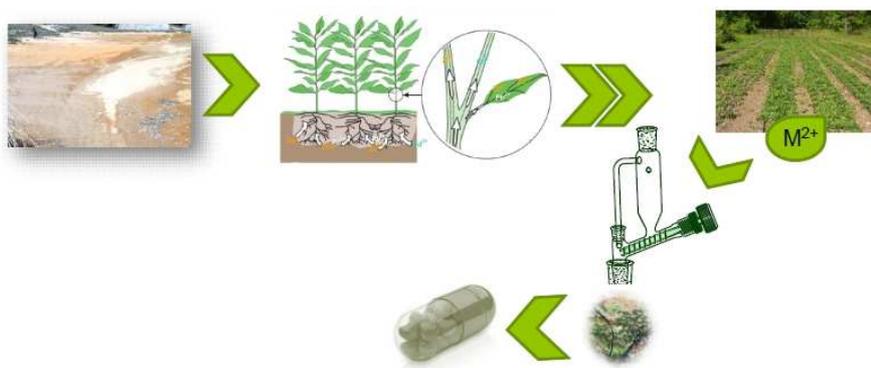
parties aériennes des végétaux hyperaccumulateurs. Des études récentes d'évaluation des performances adaptatives de ces végétaux ont mis en évidence la présence d'espèces hyperaccumulatrices de type légumineuses, renforçant l'intérêt de la phytoextraction dans les programmes de restauration écologique. Des bactéries associées, elles-mêmes uniques et spécifiques de ces sites pollués, sont devenues capables de supporter ces conditions extrêmes. Elles se comportent comme de véritables usines chimiques en réduisant l'azote présent dans l'air pour le transformer en engrais naturel afin d'aider les plantes à se développer. En échange, les plantes produisent par photosynthèse des nutriments carbonés aux bactéries, dans un sol appauvri. Malgré l'étude et la compréhension de ces systèmes naturels ingénieux, le développement de la phytoextraction est resté limité par absence de valorisation de la biomasse contaminée. Elle a été considérée comme un déchet dangereux et sans intérêt.

Récemment, notre équipe a mis au point un procédé innovant de valorisation de ces plantes extraordinaires. Elles sont à la base d'un nouveau domaine de la chimie verte, appelée catalyse écologique. Tirant parti de la capacité adaptative remarquable de ces végétaux à hyperaccumuler les cations  $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  et/ou  $Cu^{2+}$ , la conception du programme repose sur l'utilisation directe des espèces métalliques d'origine végétale comme catalyseurs « acides de Lewis » de réactions chimiques organiques. Le principe repose sur une approche mimant des catalyseurs naturels, les enzymes. Ils permettent d'accélérer des réactions infiniment lentes et sont régénérés après transformation des molécules organiques. Les catalyseurs produits à partir des plantes hyperaccumulatrices sont capables d'accélérer les réactions les plus complexes. Ils sont constitués d'espèces chimiques originales et rares, que la métallurgie n'a jamais su produire. Ces catalyseurs biosourcés montrent une réactivité tout à fait inhabituelle. Souvent supérieurs aux catalyseurs classiques de la chimie, ils permettent la synthèse de molécules d'intérêt (anticancéreux, agents antiviraux, molécules actives contre la malaria, arômes

naturels, cosmétiques, intermédiaires clés de l'industrie chimique) dans des conditions douces et d'efficacité surprenante. Bon nombre de ces molécules préparées sont présentes dans la nature. Le chimiste n'est pas à l'origine de leur activité biologique ; il se contente de la constater, d'essayer de la comprendre, de l'expliquer et de s'en inspirer. La synthèse de ces molécules permet en revanche de préserver les ressources naturelles.

La nature a donc trouvé des solutions pour s'adapter aux pollutions lourdes engendrées par les activités anthropiques : la phytoextraction. La découverte, la compréhension de ce système naturel est aujourd'hui à l'origine de vastes programmes de restauration écologique que nous développons sur de nombreux sites miniers (France, Nouvelle-Calédonie, Chine, ...). Elle permet également de développer des solutions innovantes pour le recyclage des ressources minérales et constitue une solution concrète à la criticité des matières minérales non renouvelables. Enfin, ces plantes permettent aujourd'hui de développer des catalyseurs chimiques aux performances inégalées.

L'ensemble du programme scientifique est réalisé en association étroite avec les acteurs locaux, issus des collectivités et des structures étatiques. Il est également l'objet d'actions de valorisation soutenues auprès de groupes industriels aux domaines d'applications complémentaires (Ecologie de la restauration, industries minière et chimique). Ce travail de recherche interdisciplinaire est totalement bio-inspiré. A finalité appliquée et industrielle, il entend être un moteur de la reconstruction environnementale et socio-économique de sites meurtris par des activités industrielles et minières. Les performances de la nature sont uniques : adaptables aux conditions extrêmes et génératrices de systèmes chimiques précieux. Elle est une source d'inspiration multidisciplinaire, que le chercheur se doit de comprendre pour la restaurer et la valoriser durablement. La nature est dans ce cas précis le point de départ d'une nouvelle filière verte à économie circulaire qui réconcilie l'écologie et la chimie.



*Révolution verte dans le domaine de la chimie : la phytoextraction, source d'innovation en synthèse organique force motrice de la phytoextraction.*

## Francis CARRÉ, Sanofi Chimie

Le défi de l'industrie de la santé est de trouver de nouvelles molécules pour soigner de nouvelles pathologies, à moindre coût, afin de permettre aux populations pauvres l'accès aux traitements. Nous allons voir un film montrant les travaux de notre entreprise à la frontière de la biochimie moléculaire et de la chimie de synthèse.

*Un film est diffusé.*

## Philippe MACKIEWICZ, Sanofi Chimie

Un grand nombre de principes actifs des médicaments de l'industrie pharmaceutique repose sur des molécules naturelles ou issues de molécules naturelles. Le chimiste médicinal et le pharmacologue travaillent pour améliorer les propriétés thérapeutiques de ces molécules. Une fois de nouvelles molécules sélectionnées, elles sont mises en développement pour tester puis valider leur activité thérapeutique. Pour une mise sur le marché, il faut développer un procédé de fabrication industrielle du principe actif. L'industrie pharmaceutique prend en compte les principes de chimie verte dans la totalité du processus, avec la préoccupation de trouver des alternatives aux ressources fossiles, en choisissant des matières d'origine végétale ou animale. Cette approche consiste à intervenir sur les procédés, avec des voies de synthèse innovantes et propres pour fournir aux patients des produits prenant en compte les contraintes environnementales et économiques.

Le Plavix, antiagrégant plaquettaire, a été lancé en 1998 avec un procédé initial de dédoublement en fin de synthèse, comprenant sept étapes et le recyclage d'un acide chiral. Dans le même temps, une voie asymétrique a été développée, avec seulement quatre étapes chimiques et l'utilisation d'une enzyme pour faire la matière première. Cette solution a un impact environnemental bénéfique puisque qu'elle améliore l'efficacité massique (ou tonnes de matières premières engagées par tonne de principe actif fabriqué), passant de cent litres de solvants dans la voie initiale à dix litres, et la performance économique (avec une baisse du coût d'un tiers, une diminution du temps de cycle de moitié et



*Photochimie industrielle, synthèse d'artémisinine*

un retour sur investissement du travail de développement inférieur à un an).

Un autre exemple concerne les corticostéroïdes, famille de produits lancés dans les années 1950. La matière première était la bile de bœuf dont étaient extraits des acides biliaires qui requéraient vingt étapes chimiques pour obtenir l'hydrocortisone. Dans les années 1990, le procédé a été complètement changé pour partir d'une matière d'origine végétale, le sitostérol de soja qui ne nécessitait plus qu'une étape enzymatique et neuf étapes chimiques pour obtenir l'hydrocortisone.



*Fermentation industrielle, synthèse d'hydrocortisone*

## Paul BADUEL, Sanofi Chimie

Avec la biologie de synthèse, nous avons pu fabriquer l'hydrocortisone directement à partir d'une culture de levure. L'hydrocortisone peut ensuite être modifiée chimiquement pour concevoir un certain nombre de médicaments.

Nous savons fabriquer par fermentation des antibiotiques et des vitamines depuis les années 1950. Le fait majeur de l'introduction du génie génétique dans les années 1980 a été la possibilité de produire des protéines thérapeutiques à partir de cultures de bactéries ou de cultures de cellules animales. Des années 1980 aux années 1990, nous avons pu modifier ces protéines grâce à la technologie de la biologie moléculaire. La biologie de synthèse permet l'expression coordonnée de plusieurs gènes. Elle a deux applications pharmaceutiques industrialisées pour le moment : l'artémisinine et l'hydrocortisone, produits pour lesquels le groupe Sanofi a joué un rôle majeur.

La biologie de synthèse s'est développée du fait des spectaculaires progrès réalisés dans le séquençage du génome, dans la compréhension et l'analyse du fonctionnement des gènes et dans le clonage. Sanofi

utilise la levure, de boulangerie ou de bière, car ce micro-organisme est bien connu et peut être cultivé à grande échelle. En outre, nous connaissons bien la génétique de la levure qui a été l'un des premiers micro-organismes séquencés. Enfin, la levure est un organisme supérieur qui possède des chromosomes et est capable de réaliser des réactions chimiques complexes. Dans la pratique, l'hydrocortisone est fabriquée par les mammifères à partir de cholestérol. La levure fait naturellement des stérols qui sont très proches du cholestérol. Un gène codant pour un cytochrome issu d'une plante fait la jonction entre les stérols de levure et le début de la voie de l'hydrocortisone. Les gènes suivants sont issus de la voie de biosynthèse de l'hydrocortisone des mammifères. Cette synthèse est donc hybride, avec des gènes de différentes provenances (végétale et animale).

Grâce à la chimie verte et à biologie de synthèse, nous avons beaucoup amélioré les procédés de production de médicaments en termes d'environnement. Il est important de considérer les progrès spectaculaires réalisés au cours des dix ou quinze dernières années, afin d'anticiper les progrès que fera la technologie dans les années à venir.

## Renaturer l'agriculture

François LÉGER, AgroParisTech

Philippe POUCHIN, viticulteur

Charles HERVÉ-GRUYER, maraîcher

### François LÉGER

Pourquoi se donner la peine de parler de bio-inspiration au sujet de l'agriculture puisque l'agriculture est, par construction, bio-inspirée ? La variété des systèmes agricoles traditionnels démontre le lien étroit existant entre agricultures locales et spécificités écologiques des milieux utilisés. Au cours du temps, la différenciation entre espaces cultivés et espaces naturels s'est néanmoins progressivement accentuée, en même temps que le principe de dissociation entre Société et Nature s'imposait dans les systèmes de pensée, en particulier occidentaux. Ce mouvement s'est considérablement amplifié à partir du XIXe siècle. L'agronomie, désormais érigée en science, paraît dès lors n'avoir cherché qu'à détacher l'agriculture de son environnement, pour mieux en surmonter les limites et les contraintes réelles ou supposées. La sélection rationnelle des espèces cultivées, l'apparition des engrais minéraux et de synthèse, des pesticides et aujourd'hui des OGM s'inscrivent ainsi dans une logique continue d'artificialisation destinée à mieux contrôler et dominer une Nature réputée hostile.

Les conséquences de cette artificialisation n'ont été admises qu'assez tardivement. Les effets des agricultures intensives et utilisatrices d'intrants sur l'environnement sont désormais indiscutés, de la prolifération des algues vertes en Bretagne à la pollution des nappes phréatiques. On ferme chaque année en France quatre-vingt-cinq captages d'eau potable pour des raisons de pollution d'origine agricole. Les conséquences sociales sont également considérables. Le coût de plus en plus élevé du "combat contre la nature" conduit à l'exclusion d'un nombre toujours plus grand d'agriculteurs et de paysans, partout dans le monde. Ces conséquences sociales et environnementales nous invitent à repenser radicalement l'agriculture.

### Philippe POUCHIN

Je suis vigneron sur les coteaux d'Aix-en-Provence. Il y a une quinzaine d'années, lorsque j'ai pris la responsabilité technique de cette propriété, j'ai été confronté à une difficulté. La vigne, envahie par l'herbe, mourait. La logique moderne aurait voulu que nous éradiquions l'herbe pour supprimer toute forme de concurrence avec la vigne mais le coût pour y parvenir était exorbitant. Il a

donc fallu penser autrement : conserver l'herbe et retrouver un équilibre, en intégrant toutes les fonctions en même temps, les unes par rapport aux autres. L'approche allait à l'encontre de la science viticole moderne, fondée sur une séparation des actes techniques, de la règle de laquelle est soumis le modèle commun de gestion d'une propriété viticole : on laboure, on taille, on fertilise et on met des engrais. L'approche que nous souhaitons poursuivre privilégiait au contraire une intégration et une coordination de toutes les fonctions du système appréhendé dans son ensemble.

Nous avons cherché des réponses à nos questions auprès des structures qui portaient des réflexions sur ces approches, comme l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, la FAO, qui considère que les modes de culture modernes des sols, et notamment les labours, sont la première cause de la baisse de leur fertilité. Nous avons mené une série de travaux, dans une logique scientifique, en évaluant les résultats de chacune des micro-expérimentations entreprises pour comprendre ce qui fonctionnait et ce qui ne fonctionnait pas. Au bout de trois ans, nous nous sommes aperçus que la solution n'était pas si simple, qu'il fallait retrouver un nouvel équilibre assurant la stabilité et la fertilité des sols. Au terme de nombreuses expérimentations, nous sommes parvenus à recouvrer un capital végétal très riche avec une grande biodiversité. Nous avons apprécié grâce à des indicateurs simples (l'arrêt des insecticides par exemple) combien la biodiversité apportait de services connexes, dont la stabilité n'est pas le moindre : plus la biodiversité est importante dans un système et plus le système apparaît stable et résilient.

En conclusion, nous avons juste changé notre regard. La réponse était sous nos yeux mais nous ne la voyions pas.

### François LÉGER

Le refus des modes de pensées réductionnistes est une tendance qui se développe dans le champ des sciences agronomiques, quoique lentement. L'agroécologie est un terme revendiqué d'abord par des scientifiques latino-américains qui critiquaient la révolution verte et l'impératif univoque d'augmentation de la production dans les années 1950 et 1960, consistant à appliquer, de manière assez universelle, un système basé sur la variété améliorée, les engrais et les pesticides. Un modèle technique qui, même s'il produisait généralement des

résultats incomparables à court terme en matière de rendements, conduisait à une déstructuration écologique, sociale et culturelle des sociétés hautement préjudiciable à moyen terme. L'agroécologie a été assez vite reprise, d'abord par des mouvements marginaux, autour de l'agriculture biologique, avant d'être plus largement partagée. Le *Millenium Ecosystem Assessment* de 2005 a mis en exergue la question des services éco-systémiques. Il marque le début d'une restructuration des sciences agronomiques au XXI<sup>e</sup> siècle : comment penser l'agriculture dans les écosystèmes plutôt que de l'extraire à grand prix des écosystèmes ?

L'agroécologie repose sur deux concepts centraux : le métabolisme des agroécosystèmes et le système immunitaire des agroécosystèmes. Quand on isole les plantes cultivées ou les animaux d'élevage des milieux complexes dans lesquels ils étaient historiquement immergés, on les place exclusivement face à leurs "ennemis" ou concurrents naturels. Le problème est donc de réintroduire des intermédiaires et des biais entre la plante cultivée et ses "ennemis", ces biais étant l'ensemble des fonctionnalités des écosystèmes qu'il faudra réactiver. La logique agro-écologique impose de réintroduire de la biodiversité dans les agroécosystèmes, à l'échelle du champ cultivé comme du paysage cultivé. La réintroduction de composantes variées permet de créer des interactions multiples qui évitent le face-à-face entre le parasite et la culture. Le *push and pull* des cultures de maïs en zone tropicale en est un bon exemple. Au sein du champ, le maïs est cultivé en association avec une légumineuse, un *desmodium* produisant des effets répulsifs sur la pyrale parasite du maïs. De l'herbe à éléphant, plantée en bordure de champ, attire les pyrales qui se collent dessus. Ces techniques, très simples et très peu coûteuses, permettent d'améliorer très significativement les rendements dans des sociétés où les gens n'ont pas les moyens d'acheter des pesticides. Ce jeu sur la complexité des systèmes cultivés pour favoriser des interactions biotiques et renforcer ainsi le "système immunitaire" de l'agroécosystème est l'une des bases de l'agro-écologie.

Associer dans un même milieu plusieurs composantes permet également de créer des synergies favorables et de mieux exploiter les ressources telles que l'énergie solaire, les nutriments ou l'eau. Le *desmodium* cultivé en association avec le maïs est une légumineuse fixant l'azote de l'air, qui permet ainsi de limiter les besoins en engrais azoté. Un système agricole est forcément ouvert, puisqu'une partie de la biomasse produite est exportée. Néanmoins, s'appuyer sur la diversité des espèces présentes et sur leur distribution spatiale permet d'améliorer le bouclage des cycles biogéochimiques et de réduire les apports externes de matière et d'énergie visant à compenser ces exportations. L'agronomie s'est

longtemps exclusivement attachée à mesurer les stocks d'éléments nécessaires à cette production exportée – eau, azote, phosphore, potassium. Les stocks ont leur importance, mais il est encore plus essentiel de comprendre comment ceux-ci sont mis en circulation entre les différentes composantes de l'agroécosystème, c'est-à-dire de prendre pour objet son métabolisme, et d'interpréter la production agricole, végétale ou animale, comme un phénomène écologique dont la pérennité doit se raisonner en termes d'intégrité fonctionnelle.

Prendre en compte le métabolisme et le système immunitaire de l'agroécosystème impose de considérer celui-ci dans sa globalité. Alors que les agronomes travaillaient auparavant sur la seule parcelle cultivée, il leur faut désormais travailler à l'échelle de l'exploitation entière et très souvent à celle d'un paysage complexe, support et produit d'usages multiples, complémentaires ou concurrents. Penser à ce niveau introduit une nouvelle dimension dans la pensée agricole et agronomique, celle des interactions et des coordinations entre acteurs humains. Il n'y a pas d'agroécologie qui ne considère pas les facteurs sociaux et les facteurs économiques. Cet élargissement du champ de pensée conduit à un degré de complexité où toute situation apparaît singulière. Ceci nous invite à mettre l'accent sur une autre rupture qu'impose l'agroécologie. Il ne s'agit plus de découvrir des lois universelles et des techniques universelles mais au contraire de reconditionner les techniques au local et à ses conditions particulières, écologiques, économiques et sociales, à s'inscrire dans un processus d'« accouchement » local des normes, dans lequel la production des connaissances n'est plus la propriété des scientifiques mais devient le produit de la relation dialectique permanente entre praticiens et chercheurs, entre savoirs et savoir-faire.

### Charles HERVÉ-GRUYER

Je produis des fruits et des légumes, mais aussi des plantes aromatiques, à la ferme biologique du Bec Hellouin. Nous avons actuellement un programme de recherche avec l'unité SADAPT dirigée par François Léger sur le maraîchage permaculturel. Notre projet initial, lancé en 2006, était de produire beaucoup, dans un petit espace, dans le respect de la nature, avec le moins de pétrole possible. Notre rêve est de remplacer le pétrole par le soleil et les machines par la main humaine, pour remettre l'être humain au cœur de la production agricole.

Nous avons entrepris des recherches pour mener à bien ce projet ; elles nous ont amenés à découvrir la permaculture, art né en Australie dans les années 1970 et totalement bio-inspiré. La permaculture repose sur une pensée écosystémique, à l'école de la nature. La permaculture est un système conceptuel qui part de l'observation des

écosystèmes naturels et cherche à en tirer des enseignements pour nos installations humaines (jardins, villes, entreprises...) conçues de manière holistique.

La force des écosystèmes globaux repose sur la biodiversité et les interactions. Ces systèmes ne sont pas linéaires mais marchent en boucle et en réseau, chaque élément étant relié à tous les autres, profitant aux autres et profitant des autres. Chaque fonction est remplie par plusieurs éléments et aucun déchet n'est produit puisque tout est recyclé à l'intérieur du système. Avec très peu ou pas d'intrants, la production du tout est supérieure à la somme des parties.

Nous avons conçu notre ferme comme un agroécosystème diversifié. Nous cultivons plus de 800 végétaux différents. Dans nos jardins, les arbres sont très présents, sous une forme d'agroforesterie. Les arbres mettent à disposition des sels minéraux. Notre approche vise à remplacer la machine par la main humaine. Pour rendre l'être humain compétitif par rapport à la machine, il faut utiliser les avantages concurrentiels de la main humaine qui peut prendre un soin extrême du sol. Dans la nature, le sol n'est jamais cultivé ; il n'est jamais à nu. La nature crée du sol et de la biomasse. Nous travaillons très peu le sol et laissons faire les micro-organismes. Nous sommes des créateurs d'humus et la productivité est alors au rendez-vous. Un autre facteur rend le travail à la main productif puisqu'on peut davantage densifier les cultures. Enfin, on peut associer les cultures, ce qui présente beaucoup d'intérêt.

Le programme de recherche mené avec François Léger vise à étudier mille mètres carrés, totalement cultivés à la main. Le rendement est le même que celui obtenu par le maraîchage bio mécanisé sur un hectare. Il est facile de créer une micro-ferme bio-intensive sur une petite surface, avec des coûts d'investissement réduits et des avantages environnementaux importants puisque nous enrichissons les sols et stockons du carbone. Ceci laisse entrevoir une agriculture extrêmement naturelle et productive, dans la durée. Nous visons l'auto-fertilité et l'autonomie de l'écosystème. La permaculture est une approche réellement bio-inspirée.



Crédits : C.Thiriet / Ferme du Bec Hellouin

## François LÉGER

Ces expériences sont souvent qualifiées d'utopiques ou d'exceptionnelles. La question des micro-fermes de maraîchage révolutionne actuellement les problématiques urbaines. A Détroit, la micro-agriculture est l'une des clefs des politiques de revitalisation dans une ville industrielle désertée par l'industrie. Bogota s'est dotée d'un programme d'agriculture urbaine, premier facteur d'insertion des populations des bidonvilles. La Chine mène un programme de développement de micro-agriculture biologique dans les zones péri-urbaines pour alimenter les villes et stabiliser les populations agricoles. La région Ile-de-France investit sur ces questions. Sur les toits d'AgroParisTech, au cœur du cinquième arrondissement de Paris, nous conduisons une expérience sur les supports et les techniques de culture permettant de développer l'agriculture en milieu urbain. Cette question de l'agriculture urbaine engage des dimensions économiques mais aussi sociales, car elle vise à reconstruire de la proximité. Mais les fonctions alimentaires de ces agricultures sont de plus en plus déterminantes dans les réflexions politiques.

Le mouvement général du monde, où se combinent crises économiques, sociales, environnementales, invite à repenser les systèmes alimentaires et agricoles sur d'autres bases. Le mouvement autour de l'agroécologie, où se rencontrent désormais mondes scientifiques et mouvements sociaux, théoriciens et praticiens, est central dans ce repositionnement marqué par l'impératif de nous « réimmerger » dans les écosystèmes et de recréer un lien au vivant, dont la disparition ou l'artificialisation est, de mon point de vue, l'une des causes de l'anomie culturelle et sociale qui menace nos sociétés.

## Emmanuel DELANNOY

La modestie de votre approche m'a frappé, sachant que les modèles OGM reposent sur des business plan de développement extrêmement ambitieux. Comment étendre ces modèles de production ?

## François LÉGER

L'un des principes de base qui a présidé à l'apparition de la révolution agronomique au XXe siècle, modernisation agricole occidentale ou révolution verte, était de produire à bas prix l'alimentation. Les modes de pensée et les techniques dont nous avons parlé répondent à cet enjeu et peuvent s'appliquer à la totalité des systèmes. La réglementation européenne oblige les agriculteurs à mettre des bandes enherbées en bordure de champs, notamment pour préserver les cours d'eau. Certains en profitent pour réfléchir à l'usage de ces bandes et songent à remettre des arbres dans les plaines céréalières. Leur

objectif est de réduire les coûts de production en jouant sur une amélioration de l'efficacité métabolique de l'agroécosystème.

Deux catégories d'agriculture se développent. Une agriculture pleinement productiviste dont le but est la rentabilité du capital. L'incorporation de l'activité agricole à certains fonds d'investissement est à cet égard révélatrice. Une autre agriculture développe des solutions portées par des associations d'agriculteurs cherchant à travailler ensemble dans un espace déterminé pour reconstruire des cohérences supérieures. Derrière ces nouvelles façons de pensée, de nouvelles approches économiques sont en jeu. Ces approches ne sont pas nécessairement contradictoires, du moins pour le moment.

## Philippe POUCHIN

Au vu des normes de production, dès qu'on commence à travailler à la marge, le chemin se fait en marchant. J'ai arrêté les insecticides il y a une dizaine d'années. Quand on arrête de traiter les vignes, la norme dit que la situation sera catastrophique. Or il n'est en rien. Il faut beaucoup d'observation et d'humilité pour comprendre ces phénomènes. Nous améliorons nos connaissances et bâtissons une philosophie qui n'est toutefois applicable que localement même si la méthode utilisée peut être reproduite.

## Bertrand PINEL

Je travaille pour une coopérative impliquée en agro-écologie. Nous pensons qu'il est possible de produire plus avec moins. Nous avons du mal à convaincre les adhérents de la coopérative à opérer le basculement. La société devrait peut-être rétribuer ces services écosystémiques plus qu'elle ne le fait aujourd'hui.

## François LÉGER

Les services écosystémiques que peut produire l'agriculture ne concerne effectivement pas que l'agriculture, mais leur évaluation marchande est souvent délicate ou douteuse. Il serait donc légitime qu'ils soient rétribués par l'Etat, qui se substituerait ainsi aux défaillances de marché. Le besoin de rémunération permanente n'est toutefois pas indispensable. L'un des grands défauts de l'agriculture moderne est de raisonner uniquement en termes de chiffre d'affaires alors qu'un investisseur devrait raisonner en termes de bénéfices et de plus-value. Pour convaincre les agriculteurs de la transition, nous devons les faire regarder au bon endroit de leur portefeuille. Je travaille depuis vingt ans avec des agriculteurs et des éleveurs réputés marginaux, par exemple en production de lait de brebis. Dix ans après avoir changé radicalement leur mode de production, substituant des denrées importées par des denrées produites dans et par le milieu naturel, ces personnes ont un revenu augmenté d'un tiers sans

augmenter, mais sans diminuer, leur production laitière et leur chiffre d'affaire. Le changement est nécessaire et permet d'atteindre des solutions où tout le monde est gagnant. Mais la transition agroécologique a effectivement un prix. Si la société entend aller vers cette transition, nous devons prendre la responsabilité de la soutenir. Ce soutien ne devrait-il pas se limiter à cette période cruciale où on perd les bénéfices du système

antérieur sans avoir encore atteint le moment où le nouveau système mis en place sera suffisamment rôdé pour procurer des bénéfices encore supérieurs ? Plutôt que de rémunérer des services toujours difficiles à objectiver et légitimer, ne serait-il pas plus judicieux de soutenir l'innovation et de garantir les risques associés au changement ?

## Table-ronde n°1 : Quelles recherches bio-inspirées pour la transition écologique ?

Participaient à la table ronde :

- **Vincent ARTERO, chercheur au laboratoire de chimie et de biologie des métaux (CEA / CNRS / Université Joseph Fourier)**
- **Thierry DUTOIT, directeur de recherches (CNRS-IMBE)**
- **Bruno DAVID, directeur scientifique adjoint de l'institut écologie et environnement (CNRS)**
- **George JERONIMIDIS, professeur émérite d'ingénierie des matériaux et structures composites (Université de Reading)**
- **Enric ROBINE, responsable du pôle recherche et innovation pour l'hygiène des bâtiments (CSTB)**
- **Henri VAN DAMME, directeur scientifique (IFSTTAR)**

*Le débat était animé par Robert BARBAULT, directeur du département Écologie et gestion de la biodiversité au Muséum national d'Histoire naturelle.*

Le champ couvert était très large, de la recherche de nouvelles ressources énergétiques inspirées de la photosynthèse à l'éco-inspiration nourrie par les modalités et processus de fonctionnement, de régulation, de réparation et de résilience des écosystèmes.

Cinq thématiques principales furent abordées, en lien avec divers domaines d'application concrets.

Tout commence avec l'énergie. Le premier volet abordé reposait sur le constat que, hormis pour quelques lignées reposant sur des chimio-synthèses, l'énergie solaire est, directement ou indirectement, à la source du fonctionnement de l'ensemble du monde vivant. D'où l'intérêt accordé à la photosynthèse comme processus de captation et de stockage. De nombreuses recherches portent sur ces processus, orientées notamment vers la conception de nouveaux matériaux doués de telles capacités – mais il est rappelé que le photovoltaïque est déjà une technologie mature : la bio-inspiration apparaît ici principalement comme un guide pour fabriquer des matériaux à bas coût, ce que savent faire les organismes vivants en utilisant des métaux abondants et bio-disponibles.

A l'opposé, c'est-à-dire à l'échelle des écosystèmes entiers, c'est tout le champ de l'ingénierie écologique qui a été évoqué. Une ingénierie qui semble s'organiser selon

trois axes principaux : (1) l'optimisation des fonctions du vivant, de l'organisme appréhendé dans son écosystème à l'écosystème entier ; (2) la restauration ou la réhabilitation de milieux ou écosystèmes dégradés ; (3) la conception et la réalisation de nouveaux écosystèmes doués de propriétés particulières recherchées – traitement ou recyclage des déchets, régulation de telles ou telles populations animales ou végétales, résilience.

On peut regretter que l'agro-écologie, qui s'inscrit dans cette perspective éco-inspirée et propose des solutions et expérimentations intéressantes dans le secteur stratégique de la production alimentaire durable, n'ait pu être évoquée.

Entre ces deux extrêmes, trois espaces d'application ont été introduits. Le premier, qui tourne autour des performances motrices ou sensorielles d'êtres vivants aussi divers que le poulpe, les étoiles de mer ou les oursins, est une source d'inspiration pour la réalisation de robots. Le second, dans le prolongement logique de la problématique « mouvements-locomotion », explore les développements possibles en matière de voies et infrastructures de transport, gestion de trafic ... et organisation des villes et voies de communication. Tout ça en partant des bancs de poissons !

Enfin, juste retour à l'énergie ... et à la vision écosystème, le dernier volet abordé s'est intéressé à la transposition aux bâtiments des capacités multiples des écosystèmes – par exemple en développant des toits non pas simplement végétalisés, mais réellement « écosystémisés ».

De nombreuses perspectives s'ouvrent et il est apparu que beaucoup étaient complémentaires : comme dans la nature !



*Participants de la table ronde n°1 : quelles recherches bio-inspirées pour la transition écologique ?*

## Table-ronde n°2 : Biomimétisme et société

Participaient à la table ronde :

- **Gauthier CHAPELLE, biologiste et agronome, co-fondateur de Biomimicry Europa et de Greenloop**
- **Emmanuel DELANNOY, entrepreneur et naturaliste, directeur de l'institut Inspire**
- **Michel JUFFÉ, philosophe, co-président du conseil scientifique de l'association française pour la prévention des catastrophes naturelles**
- **Pascale LOISELEUR, maire de Senlis**
- **Jean-François TOUSSAINT, physiologiste, président du groupe Adaptation et prospective du Haut Conseil de la santé publique, directeur de l'institut de recherche biomédicale et d'épidémiologie du sport**
- **Ian WILDERS, entrepreneur, président de TrueSeeds France**

*Le débat était animé par Dominique DRON, ingénieure générale des Mines, Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies.*

Quel intérêt les recherches bio-inspirées présentent-elles pour la société ? La bio-inspiration a-t-elle ses limites ? Comment permettre que chercheurs et citoyens s'approprient mieux la démarche ? Les questions posées, résolument ouvertes, invitaient à débattre des retombées bénéfiques possibles de la démarche, de ses écueils éventuels, des actions de diffusion et de formation souhaitables pour une mise en œuvre fructueuse de l'approche. Les réponses apportées ne pouvaient qu'être très partielles. On trouvera ici les points les plus saillants de ces échanges :

### **Une conviction partagée.**

Le biomimétisme est d'abord porteur d'espoir parce qu'il appelle un changement de regard – regard de l'homme sur la nature qui redécouvre en elle un vivier de solutions concrètes à son propre développement. La *nature objet* – qu'on exploite ici, qu'on combat là-bas, toujours pour satisfaire des besoins humains immédiats – devient *nature sujet*, source d'inspiration soutenable, modèle d'adaptation et de résilience, référence éprouvée de développement. Cette « conversion humaine du regard » participe d'un autre changement, plus profond : celui du rapport de l'homme à son environnement, dans une acception plus globale. Aujourd'hui fondé sur la domination et la contrainte, donnant à l'homme l'illusion de maîtrise, il pourrait être demain – et la démarche biomimétique est susceptible d'y contribuer – un rapport plus équilibré, fait

d'humilité et de respect, enrichi d'une compréhension humaine affinée de la complexité du vivant et des interactions de dépendances vitales entre ses parties. L'homme n'est-il pas, comme toute autre espèce, partie intégrante et dépendante de cette nature dont il souhaite si chèrement se singulariser ? N'a-t-il pas besoin d'elle, plus qu'elle n'a besoin de lui, pour assurer sa propre survie ?

### **Vers une approche écocentree de l'action humaine.**

La prise de conscience collective de l'interdépendance radicale de tous les êtres vivants invite l'homme à dépasser l'*approche anthropocentree* guidant aujourd'hui l'essentiel de ses actions, pour tendre vers ce qu'on pourrait tenter d'appeler l'*approche écocentree*. Si l'une et l'autre approches sont conçues par l'homme et pour l'homme, elles diffèrent notablement en substance : la première opère une distinction fondamentale entre l'homme et le reste du monde vivant en niant ou négligeant le fait que le devenir du premier est intimement lié à celui du second ; la seconde fait de la compréhension et de la sauvegarde des équilibres entre espèces l'un des piliers du maintien du bien-être et, à terme, de la survie de l'homme. Cette mutation d'approches n'est pas spontanée. Elle a besoin de « catalyseurs ». La démarche biomimétique peut en être un, en partant de la compréhension intime de la

complexité du vivant et de ses interdépendances, en faisant voir à l'homme son irrévocable appartenance au monde vivant, en choisissant de s'en inspirer pour mieux intégrer la soutenabilité dans les modes d'action et de pensée humaines.

### **Quelle éthique pour la démarche bio-inspirée ?**

Comme toute activité procédant d'un libre choix, l'approche bioinspirée n'est pas exempte de dérives – en matière d'éthique notamment. Par éthique, il est proposé ici, en première analyse, une morale de conduite humaine prenant appui sur l'approche écocentrique intégrant les dimensions humaines et environnementales de l'action, avec leurs exigences. On voit dès lors apparaître les limites d'une démarche biomimétique qui serait entendue uniquement comme une copie de processus trouvés dans le monde vivant, c'est-à-dire un ensemble de moyens. L'homme étant libre a priori de ses choix d'inspiration, des modalités de leur transposition et des fins visées par sa démarche – pourvu que ces derniers ne contreviennent pas à la loi en vigueur – la démarche bioinspirée reste, par définition, « sourde » à certaines considérations éthiques plus globales. Ainsi, par exemple, l'approche biomimétique définie comme un ensemble de moyens n'est-elle pas nécessairement soutenable dans ses résultats. D'où, sans doute, le besoin de clarifier les termes et les limites de la démarche. C'est, entre autres, l'un des enjeux du processus de normalisation internationale en cours sur la biomimétique, processus initié par l'Allemagne et auquel la France participe : préciser la terminologie et dégager les limites de l'approche, en matière de durabilité notamment. L'intérêt majeur de la démarche biomimétique doit être avant tout qu'elle contribue à ce

que les activités humaines soient compatibles avec les limites des ressources et régulations naturelles de la Terre, et non qu'elle accélère leur dépassement !

### **Comment permettre une meilleure appropriation de la démarche par les chercheurs et par un plus large public ?**

Plusieurs pistes ont été évoquées. Parmi elles, figurent la définition d'éléments de langage communs aux biologistes et aux chercheurs d'autres champs du savoir, la reconnaissance, à l'instar par exemple de l'Allemagne, du potentiel créateur de la pluridisciplinarité dans les cursus et les laboratoires, l'analyse de quelques grands enjeux de recherche fédérateurs pour lesquels la démarche biomimétique serait pertinente, la nécessité de vaincre progressivement certaines réticences culturelles ancrées (comme celle de conférer aux réalisations humaines un caractère transitoire). Le centre européen de compétences en biomimétisme que la ville de Senlis entend mettre en place sur un site dédié pourrait apporter quelques premiers éléments de réponse à ces enjeux, en soutenant par exemple des cursus d'enseignement et de formation "biomimétiques" et en rapprochant ingénieurs et biologistes autour de projets de R&D ciblés.

Enfin, surtout, il n'y aura de progrès durable sur ces sujets que si la réflexion dépasse le cercle restreint des spécialistes. Cela suppose pour ces derniers d'être capables de faire ressortir très concrètement comment les sujets développés rejoignent les préoccupations quotidiennes de chacun. S'instruire, expliquer et « donner envie », voilà peut-être les premières clés du succès pour y parvenir. Elles appartiennent à chacun de nous.



*Participants de la table ronde n°2 : biomimétisme et société*





## Clôture du colloque

**Laurent TAPADINHAS, Directeur de la recherche et de l'innovation au Commissariat général au développement durable, ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie**



Vous avez été nombreux – chercheurs, industriels, représentants d'associations, élus – à participer à la préparation de cette journée, et je sais que les exposés et les débats auxquels nous venons d'assister n'auraient pu être aussi riches sans votre implication et vos contributions. Je conclurai donc

les échanges de cette journée en commençant par vous remercier. Je voudrais saluer l'accueil du Muséum national d'Histoire naturelle, et plus particulièrement le soutien et l'implication de son président – Gilles Boeuf – qui a assumé la présidence du comité d'organisation de cette journée. Grâce à son action, cette manifestation a pu se tenir au cœur même du Jardin des plantes, en ce lieu riche de symboles pour la connaissance et l'utilisation de la biodiversité. Merci. Je remercie aussi les membres du comité scientifique du colloque, présidé par Gilles Boeuf, et bien sûr tous nos intervenants pour leur participation et leur contribution. Je n'oublierai pas enfin les doctorants qui ont répondu à notre appel à posters, et dont vous avez pu prendre connaissance des travaux pendant les pauses de cette journée. A vous tous, merci.

L'organisation de ce colloque par le ministère n'est pas, vous l'aurez compris, un choix dû au hasard. Il répond à la volonté du Commissariat général au développement durable d'aborder et, le cas échéant, de promouvoir toutes les démarches qui pourraient contribuer au développement durable. La démarche « bio-inspirée » en tant que réponse possible – parmi d'autres – aux multiples défis de la durabilité nous semblait devoir être examinée avec attention. Ce colloque ouvre des perspectives sur cette démarche : en prenant la nature pour modèle, les travaux issus de ces recherches pourraient accompagner le développement de voies de production de biens et de services mobilisant moins de ressources rares et respectant davantage l'homme et son environnement. C'est une démarche prometteuse, dont les potentialités en matière de recherche et de développement méritent d'être approfondies.

Nous savons que les approches bio-inspirées sont encore marginales en France. Elles sont ignorées de nombreuses disciplines des sciences et de l'ingénierie, qu'il s'agisse par exemple de la chimie, du génie civil et de la construction, des sciences des matériaux, de l'ingénierie des transports ou encore de l'agronomie. C'est donc un plus fort « ancrage » de ces approches biomimétiques dans les pratiques de la recherche scientifique que nous appelons aujourd'hui de nos vœux, non parce qu'elles résoudront tous nos problèmes environnementaux, mais parce qu'elles peuvent déboucher sur des innovations plus soutenables, qu'elles soient incrémentales ou de rupture.

Quoiqu'offrant une vision nécessairement très parcellaire des travaux bio-inspirés en France et en Europe, les exposés de ce matin nous ont montré la maturité scientifique croissante de certaines recherches intégrant la démarche. J'ai retenu, pour ma part, les travaux qui permettraient de contribuer aux orientations fixées dans le cadre de la conférence environnementale, conférence qui a rappelé l'importance de l'existence et de la connaissance fine de l'extraordinaire richesse du vivant, de sa diversité :

- les recherches menées à la Direction des sciences du vivant du CEA, où ont été mis au point des complexes chimiques directement inspirés du fonctionnement des sites actifs d'hydrogénases, complexes catalysant la synthèse d'hydrogène propre ; les résultats ne dépassent pas encore le stade de la recherche mais ils pourraient, à terme, ouvrir la voie d'une véritable transition énergétique, transition dont la nécessité, voire l'urgence, ont été mises en exergue lors des récents travaux de la conférence environnementale ;
- les nombreux travaux concernant l'élaboration de matériaux composites, aux propriétés mécaniques ou structurales remarquables, ou encore le développement de biocapteurs ultrasensibles, plus performants et plus durables, qui sont autant de techniques d'élaboration innovantes fondées sur l'observation fine des structures et fonctions ingénieuses déployées par les plantes et les insectes ;
- la mise à jour, dans les laboratoires du Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive du CNRS, de procédés originaux d'extraction de métaux par des plantes cultivées sur des sols pollués et la valorisation de ces espèces métalliques extraites comme catalyseurs bio-sourcés pour la synthèse

de molécules pharmaceutiques (telles que les anti-paludéens), synthèse réalisée dans des conditions plus douces et plus efficaces que celles prévalant avec les catalyseurs conventionnels ; ces travaux déboucheront sur l'amélioration de notre environnement en même temps, à terme, que sur celle de notre santé ; ils contribueront à la prévention des risques sanitaires et environnementaux, troisième axe de la conférence environnementale ;

- enfin, le développement de pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement et de sa diversité, inspirées d'une appréhension affinée du fonctionnement des écosystèmes.

Je n'oublierai pas les fructueux échanges des deux tables-rondes de cet après-midi qui ont esquissé les premières lignes d'un vrai débat sur les perspectives de recherches bio-inspirées à impulser dans notre pays et sur les retombées possibles de ces recherches pour notre société.

Ne nous y trompons pas : la démarche bio-inspirée est exigeante et difficile à mettre en œuvre. Elle suppose d'abord un véritable décloisonnement des disciplines, et l'instauration d'un dialogue pérenne entre spécialistes du vivant, "technologues" et ingénieurs. Cela n'est pas chose aisée. Elle impose aussi, bien souvent, le déploiement d'une expérimentation et d'une abstraction à des échelles physiques très diverses, allant de l'ångström au kilomètre. Elle replace enfin l'observation des phénomènes naturels au cœur de la pratique scientifique, donnant ainsi toute son actualité aux disciplines développées dans ces lieux illustres dès lors qu'elles grandissent en lien avec les sciences plus proches des réalités économiques.

Vous l'avez sans doute compris au travers des interventions de cette journée : notre ambition n'est pas de créer un champ disciplinaire nouveau, mais plutôt de stimuler une démarche nouvelle auprès des spécialistes et des non-spécialistes du vivant. C'est une démarche qui prend appui sur le vivant, qui s'en inspire et qui se projette hors du vivant sans jamais perdre de vue ses principes. C'est une démarche que le ministère souhaite accompagner de plusieurs manières. D'abord en relayant l'intérêt et le potentiel de telles approches dans ses domaines de compétences auprès des organismes sous sa tutelle. Ensuite en apportant son soutien aux "chevilles ouvrières" de la recherche, c'est-à-dire aux doctorants, selon des modalités que nous allons nous attacher à définir ; l'instauration d'un prix de thèse, par exemple, ou l'allocation de subventions pour des projets de thèses ciblés pourraient être envisagées. Enfin peut-être, en contribuant à l'élaboration d'une feuille de route qui mette en perspective les principaux enjeux et besoins, et qui fixe des objectifs à atteindre et des moyens à mobiliser pour une meilleure appropriation de la démarche par les acteurs concernés.

J'espère que cette journée aura permis de mieux jauger l'intérêt et le potentiel de telles approches et qu'elle appellera d'autres actions, plus ambitieuses, au service de recherches bio-inspirées et soutenables.

## Exposition « Posters »

Un appel lancé par les organisateurs du colloque auprès des chercheurs a permis à quelques doctorants, dont la thèse s'inscrivait dans le champ de la bio-inspiration, d'exposer, le jour de l'événement, leurs travaux de recherche sous la forme de « posters ».

Une copie électronique des posters exposés et le résumé des travaux associés sont rassemblés ci-après.



*Exposition des posters présentés par les doctorants en marge du colloque*

## Les fourmis moissonneuses, outil pour une restauration écologique bio-inspirée

**Adeline Bulot<sup>1</sup>, Erick Provost<sup>2</sup>, Marielle Renucci<sup>2</sup>, Thierry Dutoit<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> UMR CNRS-IRD IMBE, Université d'Avignon, IUT, Site Agroparc BP 61207, 84911 Avignon cedex 09

<sup>2</sup> UMR CNRS-IRD IMBE, Aix-Marseille Université, Bâtiment Villemin, Europôle de l'Arbois - BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 04

L'utilisation d'espèces « ingénieurs des écosystèmes » peut être considérée comme une méthode bio-inspirée du fonctionnement du vivant au niveau de l'organisation des communautés et écosystèmes. Il s'agit d'utiliser les propriétés de ces organismes comme une technique « durable » pour résoudre des problèmes environnementaux liés aux activités humaines. C'est notamment le cas dans la plaine de Crau (Bouches-du-Rhône) où une importante fuite d'un oléoduc (7 août 2009) a eu lieu, déversant 4700 mètres cubes de pétrole et détruisant plus de 5 ha de végétation steppique au cœur d'une réserve naturelle nationale. Le sol pollué (5 ha sur 50 cm de profondeur en moyenne) a été excavé et évacué en décharge. Le trou généré a ensuite été comblé par 72 000 tonnes de sol issu d'une carrière proche. Les premiers résultats de cette réhabilitation faisant appel au génie civil montre qu'il est impossible de restaurer à court terme la diversité et la structure spatiale de la végétation acquise pendant 6000 ans d'interactions entre le climat méditerranéen, un sol peu profond et le vivant incluant un pastoralisme multiséculaire transhumant ovin. Une méthode visant à réimplanter des reines fondatrices de fourmis moissonneuses a donc été testée dans le but de favoriser la redistribution des espèces végétales pour reconstituer la structuration spatiale des populations végétales steppiennes. L'espèce choisie est *Messor barbarus*. Celle-ci joue un rôle clé sur l'abondance, la distribution des plantes et sur la structuration des communautés végétales par la récolte, le transport, et la perte de petites quantités de graines. Elles peuvent notamment transporter 63% des espèces de plantes à fleurs de la Crau sur 30 m de long. Après un an, nos résultats montrent un bon taux de survie des fondatrices implantées (40%) sur le site réhabilité. Il faudra encore attendre plusieurs années pour mesurer un éventuel effet significatif sur la végétation.

# Les fourmis moissonneuses, outil pour une restauration écologique bio-inspirée

Adeline Bulot, Thierry Dutoit, Marielle Renucci et Erick Provost

adeline.bulot@imbe.fr, thierry.dutoit@imbe.fr, marielle.renucci@imbe.fr, erick.provost@imbe.fr  
 Université d'Avignon, UMR CNRS IRD IMBE, Site Agroparc, BP 1207, 84911 Avignon Cedex

L'utilisation des ingénieurs de l'écosystème peut être considérée comme une méthode bio-mimétique du fonctionnement du vivant appliquée à l'ingénierie au niveau de l'organisation des écosystèmes. En effet, il s'agit d'utiliser les propriétés de ces organismes, comme techniques « durables » pour résoudre des problèmes liés aux activités humaines par exemple en restauration écologique. Une méthode visant à réimplanter des reines de fourmis moissonneuses a été développée, sur un site détruit par une pollution aux hydrocarbures dans la plaine de la Crau (Sud-Est de la France), dans le but de favoriser la redistribution des espèces végétales. L'espèce choisie est la fourmi *Messor barbarus* car celle-ci joue un rôle clé sur l'abondance, la distribution des plantes et sur la structuration des communautés végétales par la récolte, le transport, et la perte de petites quantités de graines. Elles peuvent notamment transporter 63% des espèces de plantes à fleurs de la Crau sur 30m de long.

## 7 août 2009

### → Rupture d'un oléoduc de la société SPSE

- 4700m<sup>3</sup> de pétrole brut déversé sur 5,3ha
  - En plein cœur de la Réserve Naturelle des Coussouls de Crau
- = destruction de la végétation pseudo-steppique



Mise en place de protocoles expérimentaux de restauration écologique, et de recherche fondamentale et appliquée

Implantation artificielle de reines de fourmis moissonneuses

## Pourquoi imiter la nature en implantant artificiellement des colonies de fourmis?

### Recherche fondamentale

- Est-il possible de le faire ? Quelle technique utilisée ?
- 2 hypothèses de travail :

Dispersion-limitant = pas de recolonisation naturelle  
 Habitat-limitant = en contrôlant l'habitat, le taux de réussite dans l'implantation des colonies est meilleur que lors d'installations naturelles

### Applications

- Possibilité de travailler avec une cohorte de fourmis transplantées dont les conditions d'installation sont connues
- Utilisation des fourmis pour leur qualité d'ingénieurs de l'écosystème en restauration écologique

## Méthodologie

### Récolte de reines fécondées de *Messor barbarus*

- Automne 2011 stockage, après le vol nuptial, dans des tubes à essais (avec du coton humidifié au fond),

### Implantation des reines sur le site accidenté

- Distances de 5m, 15m, 25m testées par rapport à la lisière avec la pseudo-steppe intacte (170 reines) + 60 reines dans la pseudo-steppe



creusement d'une cavité

dépôt de la reine

galet placé par-dessus numéroté et géoréférencé

### Vérification de la réussite des installations

Critères successifs de la réussite de la transplantation

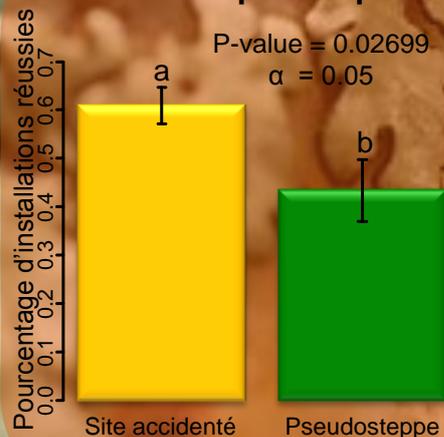


Tunnel vertical creusé par la reine (jours suivant son installation)

Couvain (œufs, larves, nymphes), ici dans une loge au contact du galet et profitant de la chaleur du soleil emmagasinée par celui-ci

Premières ouvrières, de taille réduite

## Résultats: printemps 2012



- Taux de réussite plus élevé sur le site accidenté que dans la pseudo-steppe

= peut être expliqué par une prédation par les arthropodes (scolopendres, araignées) moindre, ceux-ci recolonisent progressivement le site accidenté

## Perspectives

- A long terme, suivi du développement des nouvelles colonies jusqu'à l'âge mûre des nids
- Utilisation de ces fourmis moissonneuses comme agents de redistribution des graines de la pseudo-steppe de Crau en ingénierie écologique avec des rôles attendus au niveau de la restructuration de la végétation

## Biomimétisme et véhicule décarboné : génération de concepts innovants bio-inspirés à partir de la méthode C-K

**Camila Freitas Salgueiredo<sup>1,2,3</sup>, Philippe Doublet<sup>1</sup>, Sébastien Glaser<sup>2</sup>, Stéphane Doncieux<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Renault, Direction de la recherche, des études avancées et des matériaux, 1 avenue du Golf, 72888 Guyancourt cedex

<sup>2</sup> IFSTTAR, LIVIC, 14 route de la Minière, 78000 Versailles-Satory

<sup>3</sup> ISIR, CNRS UMR 7222, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, 75252 Paris cedex 05

Dans le contexte actuel, le secteur des transports a pour défi d'atténuer les effets du changement climatique, d'améliorer la qualité de l'air dans les centres urbains et de réduire la dépendance au pétrole. Dans cette perspective, la recherche se consacre à réduire les émissions polluantes et à mettre au point l'exploitation d'énergies alternatives. Pour apporter une réponse rapide et significative à ces défis, des percées technologiques sont nécessaires. Les systèmes vivants sont une source d'inspiration jusqu'ici peu explorée pour innover et pour améliorer des technologies conventionnelles. Cette démarche « d'inspiration de la nature », appelée également biomimétisme, a déjà proposé des concepts novateurs comme les films antimicrobiens inspirés de la peau des requins et les algorithmes d'optimisation basés sur le comportement des colonies de fourmis. Cette thèse vise à utiliser l'approche biomimétique dans le projet du véhicule décarboné. Nous souhaitons étudier la génération de nouveaux concepts et de nouvelles solutions bio-inspirées afin de réduire les émissions de dioxyde de carbone des véhicules sur l'ensemble de leur cycle de vie. La « théorie C-K de la conception » appuiera la modélisation du processus de bio-inspiration et la génération des concepts innovants bio-inspirés. Les résultats préliminaires obtenus en appliquant la théorie C-K dans un cadre de conception bio-inspirée mettent en évidence des pistes de conception inattendues et la production de nouvelles connaissances. Dans les prochaines étapes de ces travaux nous essayerons de développer des solutions bio-inspirées et nous évaluerons les gains en termes d'émissions de dioxyde de carbone.

# BIOMIMÉTISME ET VÉHICULE DÉCARBONÉ

## GÉNÉRATION DE CONCEPTS INNOVANTS BIO-INSPIRÉS À PARTIR DE LA MÉTHODE C-K



Camila FREITAS SALGUEIRO  
Thèse CIFRE RENAULT (P. DOUBLET) / IFSTAR-LIVIC (S. GLASER) / ISIR (S. DONCIEUX)  
camila.freitas-salgueiro@renault.com



Le réchauffement climatique, l'épuisement des ressources fossiles, la qualité de l'air dans les grands centres urbains et les nouveaux besoins de mobilité remettent en question l'automobile et son utilisation. Une rupture technologique est nécessaire car l'amélioration des technologies automobiles conventionnelles ne suffira pas. La nature est une source d'inspiration pour développer des solutions innovantes qui permettront de réduire l'empreinte carbone des véhicules du futur.

### CONTEXTE ET MOTIVATIONS

Le concept du **véhicule décarboné**, avec des faibles émissions de CO<sub>2</sub> sur l'ensemble du cycle de vie, est une réponse possible aux enjeux du développement durable:



### LE BIOMIMÉTISME : CONCEVOIR EN S'INSPIRANT DE LA NATURE

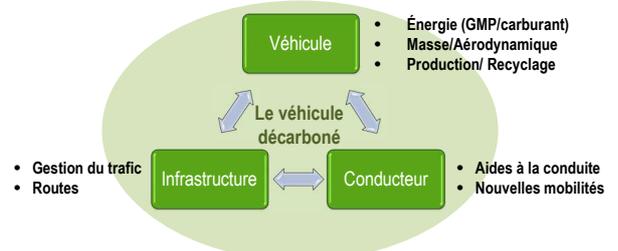
Le **biomimétisme** est le développement de nouveaux concepts et de technologies à partir des recherches sur les structures, processus et systèmes de la nature. Exemples :

Technologie	Inspiration	Caractéristique intéressante pour l'application technologique
Film Sharklet	La peau des requins	Propriétés antimicrobiennes
Cellules à pigment photosensible (Cellules Grätzel)	La photosynthèse	Production d'énergie à partir de l'énergie solaire
Algorithmes d'optimisation par colonies de fourmis	Le comportement des fourmis	Recherche d'itinéraires optimaux



**Objectif de la thèse :** étudier la génération de nouveaux concepts et solutions bio-inspirés à partir du cas du « véhicule décarboné » et évaluer l'intérêt de cette démarche pour la conception innovante.

Domaines d'amélioration pour le véhicule décarboné :



Les améliorations des technologies conventionnelles ne permettront pas d'atteindre les objectifs de réduction des impacts environnementaux.

La bio-inspiration permet d'explorer des domaines nouveaux et peut apporter des solutions et des concepts en rupture pour le véhicule décarboné.

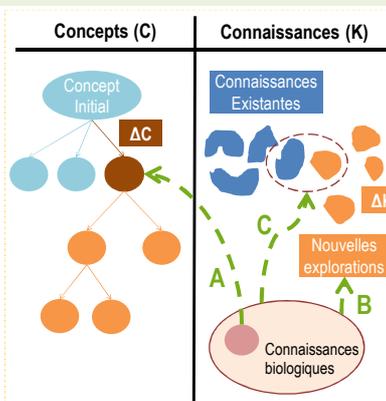
### PREMIERS RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

#### Modélisation du processus de bio-inspiration

La bio-inspiration n'est pas un « transfert » de technologies de la nature vers l'ingénierie. Le processus de bio-inspiration a été modélisé à l'aide de la **théorie C-K de la conception** (Hatchuel et Weil, 2002 [1]).

La théorie C-K décrit le raisonnement de conception comme la mise en relation de deux espaces : l'espace des concepts (C) et l'espace des connaissances (K). Le diagramme suivant schématise le processus de bio-inspiration [2] :

- Les connaissances biologiques fournissent des « directions de conception » ( $\Delta C$ ) inattendues.
- Ces directions de conception ne sont exploitables que si accompagnées de la production de connaissances nouvelles ( $\Delta K$ ) indispensables pour déboucher sur une solution.



C. Ces connaissances nouvelles se développent dans des domaines jusque-là ignorés ou qui rapprochent des connaissances éloignées ( $K_1 \cap K_2 = \emptyset$ ).

Cette modélisation permet de guider sur le terrain un processus de bio-inspiration.

#### Prochaines étapes

- Utilisation de ce modèle et de la théorie C-K pour l'étude des concepts / connaissances bio-inspirés pour le véhicule décarboné.
- Développement de quelques solutions bio-inspirées et évaluation des gains en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>.

#### Références

- Hatchuel, A., et Weil, B. (2002), La théorie C-K : fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception, Colloque sciences de la conception, Lyon.
- Freitas, C., Modelling inspiration for innovative NPD: lessons from biomimetics. Soumis pour la conférence IPDM 2013.

### APPORTS

- Structuration d'une démarche de bio-inspiration pour stimuler l'innovation
- Evaluation de cette démarche bio-inspirée par rapport à d'autres méthodes de conception innovante

#### PARTENAIRES:

Théorie et Méthodes de la Conception Innovante  
Chaire d'Enseignement et de Recherche



CHANGEONS DE VIE  
CHANGEONS L'AUTOMOBILE



## Une approche globale éco-inspirée : de la restauration écologique à la chimie durable biosourcée

**Vincent Escande<sup>1</sup>, Claire Grison<sup>2</sup>, Guillaume Losfeld<sup>1</sup>, Clémence Bes<sup>1</sup>, Claude Grison<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> UMR CNRS 5175, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, 1919 Route de Mende, 34293 Montpellier

<sup>2</sup> Environmental Research Institute, University College Cork, Lee Road, Cork, Irlande

Les exploitations minières intensives de différents sites gardois sont à l'origine d'une forte pollution des sols par des Eléments Trace Métalliques (ETM). La phytoremédiation est l'une des rares solutions intéressantes de réhabilitation durable des sols contaminés par les ETM. Les phytotechnologies les plus étudiées sont la phytostabilisation et la phytoextraction. La première consiste à recouvrir ces sols par des espèces végétales tolérantes aux ETM, la seconde permet de les extraire partiellement à l'aide d'espèces végétales hyperaccumulatrices d'ETM. La phytoextraction est une écotechnologie de dépollution partielle des sols et des sédiments par accumulation des ETM dans les parties aériennes des végétaux hyperaccumulateurs. Son développement reste limité par absence de valorisation de la biomasse contaminée. Les essais les plus avancés concernent essentiellement la phytoexploitation minière ou phytomining. L'objectif général de nos travaux est de contribuer au développement d'un procédé de chimie verte initié par l'équipe. Il s'appuie sur les propriétés adaptives de communautés végétales devenues capables d'hyperaccumuler les ETM. Dans chaque cas, les plantes tolérantes et hyperaccumulatrices d'ETM constituent un réservoir naturel de métaux de transition précieux en synthèse organique. Ils sont utilisés comme catalyseurs et réactifs de réactions à haute valeur ajoutée, destinés à la synthèse organique, supportés sur des stériles ou des scories finement divisés. La production de ces écomatériaux à partir de plantes hyperaccumulatrices d'ETM constitue une innovation pour la chimie verte puisque la catalyse est désormais réalisée au moyen de biomasse dont la production assure une véritable valorisation économique de la restauration d'anciens sites pollués.

# Une approche globale éco-inspirée : de la restauration écologique à la chimie durable biosourcée

V. Escande<sup>1,\*</sup>, C. M. Grison<sup>2</sup>, G. Losfeld<sup>1</sup>, C. Bes<sup>1</sup>, C. Grison<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive UMR CNRS 5175, 1919 Route de Mende F34293 Montpellier cedex 5  
<sup>2</sup> Environmental Research Institute, University College Cork, Lee Road, Cork-Irlande

(\*) courriel : vincent.escande@cefe.cnrs.fr

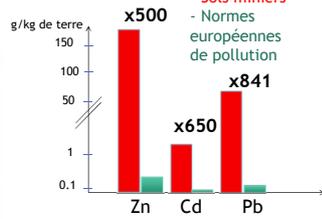
## La réponse de la nature à la pollution minière...



Les exploitations minières intensives et les activités industrielles métallurgiques sont à l'origine d'une forte pollution des sols par les éléments traces : Zn, Pb, Cd, As...



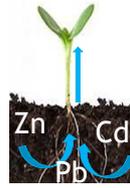
Sols pollués en éléments traces Zn, Cd, Pb, As



Les sites concernés paient un lourd tribut à cette pollution : impacts sanitaires, environnementaux, mais aussi frein au développement économique et touristique...

L'excavation ou le confinement de zones contaminées ont été mis en place sur certains sites, mais ces techniques ne peuvent pas constituer des solutions satisfaisantes. Peu inspirées, mal acceptées, elles sont coûteuses et ne résolvent rien.

Il y a quelques années, des plantes rares ont été découvertes, capables de se développer sur des sols désertiques car devenus phytotoxiques : ce sont des végétaux hyperaccumulateurs d'éléments traces métalliques.



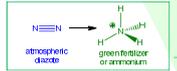
Parmi ces plantes accumulatrices, la présence de légumineuses renforce l'intérêt de la phytoextraction : au contact des racines, des bactéries associées ont été récemment découvertes. Elles-mêmes spécifiques de ces sols pollués, elles sont devenues capables de supporter ces conditions extrêmes.



Elles se comportent comme de véritables usines chimiques en réduisant l'azote présent dans l'air pour le transformer en engrais naturel afin d'aider les plantes à se développer.

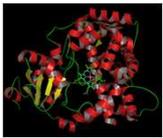


En échange, les plantes produisent par photosynthèse des nutriments carbonés aux bactéries, dans un sol appauvri.



## ... une source d'inspiration pour la chimie durable :

Récemment, notre équipe a mis au point un procédé innovant de valorisation de ces plantes extraordinaires.<sup>1</sup> Elles sont à la base d'un nouveau domaine de la chimie verte, appelée catalyse écologique.



Inspiré par les catalyseurs naturels que sont les enzymes, notre programme repose sur l'utilisation directe des espèces métalliques accumulées par les plantes comme catalyseurs « acides de Lewis » de réactions chimiques organiques.

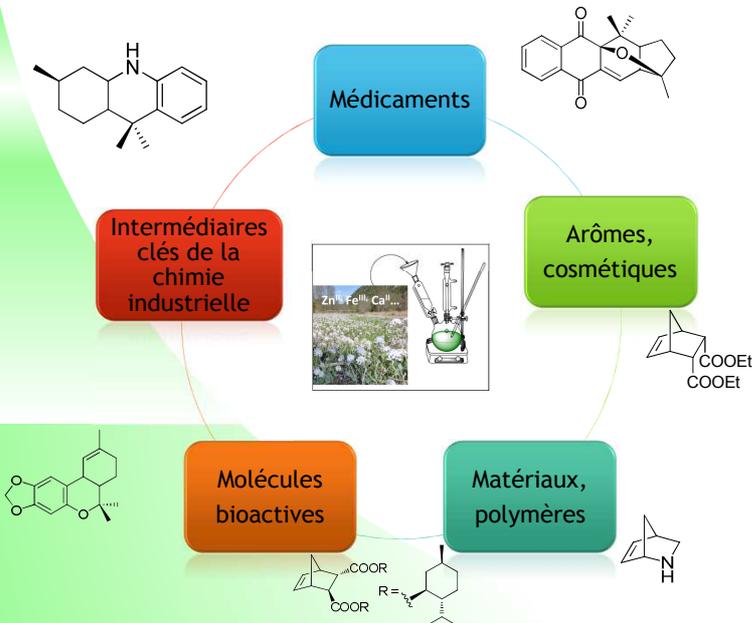
### Préparation des catalyseurs biosourcés :



Des cultures de plantes hyperaccumultrices sont développées sur des sites miniers, dégradés par la pollution métallique.

Ces végétaux hyperaccumulateurs extraient et concentrent la pollution métallique du sol dans leurs parties aériennes.

Par un procédé simple et sobre en énergie, les plantes chargées en métaux sont transformées en catalyseurs métalliques acides de Lewis, très utilisés en chimie organique, notamment dans l'industrie.



- Les catalyseurs produits à partir des plantes hyperaccumultrices sont capables de catalyser les réactions les plus complexes.
- Souvent supérieurs aux catalyseurs classiques de la chimie, ils permettent la synthèse de molécules d'intérêt dans des conditions douces et d'efficacité surprenante.
- Nous développons aujourd'hui différents programmes où la restauration écologique est directement associée à la synthèse organique (France, Nouvelle-Calédonie, Chine, Gabon...).
- Ce programme apporte des solutions innovantes pour développer le recyclage des ressources minérales et constitue une solution concrète à la criticité des matières minérales non-renouvelables.

## RÉVOLUTION VERTE DANS LE DOMAINE DE LA CHIMIE :

LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE SOURCE D'INNOVATION EN SYNTHÈSE ORGANIQUE,

LA SYNTHÈSE ORGANIQUE FORCE MOTRICE DE LA RESTAURATION ÉCOLOGIQUE.

<sup>1</sup>C. Grison, J. Escarré, PCT Int. Appl. 2011, WO 2011064487 and WO 2011064462 ; C. Grison, V. Escande, G. Losfeld, CNRS patent 2012, n° INPI 1000142593 ; C. Grison, V. Escande, CNRS patent 2012, n° INPI 1000157898

## Une chimie dépolluante bioinspirée

Claire Grison<sup>1</sup>, Alan Dobson<sup>1</sup> et Claude Grison<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Environmental Research Institute, University College Cork, Lee Road, Cork, Irlande

<sup>2</sup> UMR CNRS 5175, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, 1919 Route de Mende, 34293 Montpellier

Un vaste programme de phytoremédiation est développé sur l'ancien site minier de Saint-Laurent-Le-Minier (Gard, France) grâce à la légumineuse hyperaccumulatrice de métaux lourds *Anthyllis vulneraria*. Une bactérie Gram-négative, aérobique, en forme de bâtonnet, non sporulante a été isolée des nodosités de 56 plants d'*A. vulneraria*. Sur la base de la similarité de séquences de l'ARN16S, cette bactérie appartient au genre *Rhizobium* ayant phylogénétiquement comme plus proche voisin *Rhizobium etli* (AY460185.1). Cette nouvelle espèce de *Rhizobium* s'est avérée être tolérante à de fortes concentrations en zinc (35 mM) et cadmium (0.5 mM) suite à des tests cinétiques de croissance sur milieux artificiellement enrichis en métaux lourds. Ces résultats de tests physiologiques et d'apparenté ont permis de différencier génotypiquement et phénotypiquement cette bactérie comme une nouvelle espèce, *Rhizobium metallidurans*. Cette nouvelle espèce de *Rhizobium* constitue une véritable opportunité pour améliorer l'efficacité du programme de phytoremédiation. *R. metallidurans* est l'une des rares bactéries à posséder comme seule voie de dégradation des sucres, la voie d'Entner Doudoroff (ED). Elle dégrade le glucose en passant par un intermédiaire métabolique clé et uniquement présent dans cette voie catabolique : le KDG ou acide 2-céto-3-desoxy-D-erythrohexonique. Ainsi l'apport de ce sucre comme seul substrat carboné favoriserait spécifiquement la croissance de *R. metallidurans*, les autres bactéries ne pouvant le métaboliser car ne possédant pas la voie d'ED. Sur un tel sol minier appauvri en substrat carboné, *R. metallidurans* ne serait plus en compétition avec les autres bactéries et pourrait se développer sans concurrence grâce à la métabolisation du KDG. Ce sucre n'a jamais été synthétisé par voie chimique. Une voie de synthèse originale et rapide du KDG a été réalisée en sept étapes avec un rendement total de 62%. Elle est énantiomériquement pure afin d'assurer 100% de reconnaissance par les enzymes de la voie d'ED et donc une assimilation totale.

# LA CHIMIE DU VIVANT AU SERVICE D'UNE SYMBIOSE RHIZOBIUM LEGUMINEUSE



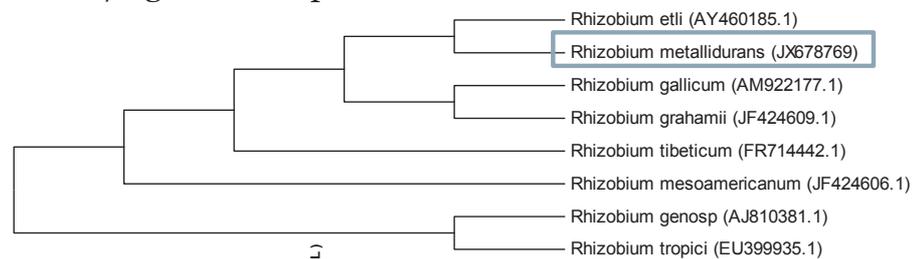
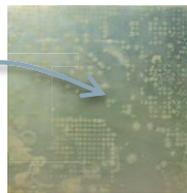
Claire Grison<sup>1,2</sup>, Pr. Alan Dobson<sup>1</sup>, Pr. Claude Grison<sup>2\*</sup>

1. Environmental Research Institute  
University College Cork  
Lee Road  
Cork - Irlande

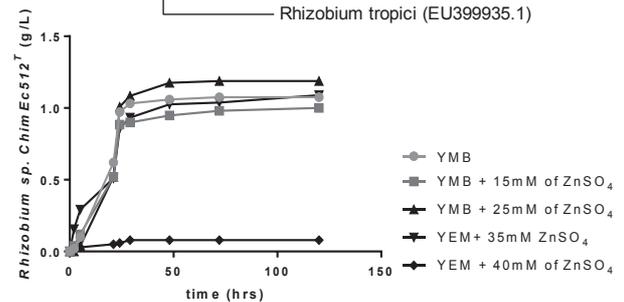
2. Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive  
UMR5175-Campus CNRS 1919 route de Mende  
34293 Montpellier cedex 5  
\* claudie.grison@cefe.cnrs.fr

*Objectif : Stimuler la croissance d'une légumineuse dépolluante en favorisant la croissance de sa bactérie symbiotique par l'apport d'un sucre clé de son métabolisme, synthétisé par une chimie bioinspirée*

Une nouvelle symbiose rhizobium/légumineuse prometteuse sur site minier

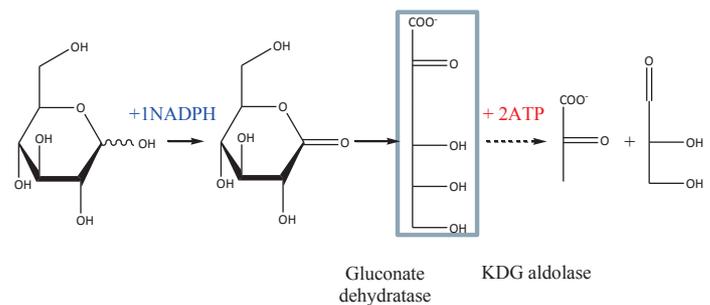


Un programme de remédiation est développé sur l'ancien site minier de Saint-Laurent-Le-Minier (Gard, France) grâce à la légumineuse hyperaccumulatrice de métaux lourds *Anthyllis vulneraria*. Une nouvelle espèce symbiotique de rhizobium a été isolée et caractérisée génotypiquement, phénotypiquement et métaboliquement.

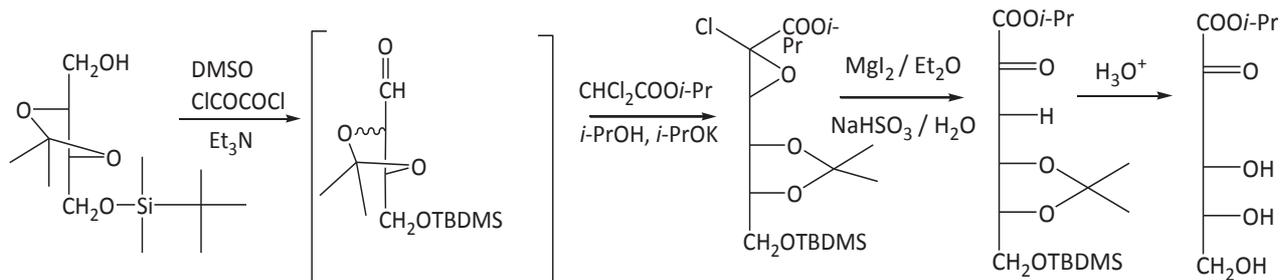


La Voie d'Entner Doudoroff : une stratégie d'adaptation naturelle, une approche bioinspirée

*Rhizobium metallidurans* est une des rares bactéries à posséder la voie d'Entner Doudoroff pour dégrader le glucose en passant par un intermédiaire métabolique clé et unique : le KDG ou acide 2-céto-3-desoxy-D-erythrohexonique. Nous supposons que l'apport de ce sucre comme seul substrat carboné favoriserait la croissance de *R. metallidurans* par rapport aux autres bactéries présentes dans le même environnement.



Synthèse multi-étape énantiospécifique du KDG



La synthèse énantiospécifique du KDG a été réalisée avec un rendement total de 62%. Il reste encore à adapter cette synthèse à grande échelle afin de tester l'efficacité du sucre sur son assimilation par *Rhizobium metallidurans* en milieu liquide.

## L'utilisation de macrophytes en tant que bioindicateurs de l'efficacité épuratoire : un outil permettant d'évaluer les démarches de biomimétisme relatives à la phytoépuration

**Anna Guittonny-Philippe<sup>1,2</sup>, Julien Viglione<sup>2</sup>, Véronique Masotti<sup>1</sup>, Isabelle Laffont-Schwob<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> UMR CNRS 7263 / IRD 237, IMBE, Aix-Marseille Université, 3 place Victor Hugo case 4, 13331 Marseille

<sup>2</sup> ECO-MED SARL, Tour Méditerranée 13<sup>e</sup> étage, 65 avenue Jules Cantini, 13298 Marseille cedex 20

Les zones humides (ZH) situées à l'aval des bassins versants anthropisés reçoivent des pollutions diffuses qui impliquent l'exposition simultanée ou séquentielle à des mélanges de contaminants qu'il est difficile de suivre et de gérer. Au sein des ZH réceptrices, certaines espèces végétales et microbiennes possèdent des stratégies de détoxification. Grâce à cette capacité d'autoépuration, les ZH sont souvent considérées comme des filtres naturels permettant d'assainir les eaux qui les traversent. Néanmoins, ces milieux constituent d'importants réservoirs de biodiversité et la pollution est l'une des principales causes du déclin de leur richesse spécifique. Ainsi, sur la base d'un site pilote au sud de l'Etang de Berre (Interface Zone Industrielle du Bausset / Marais des Paluns), nous étudions une solution qui consiste à délocaliser la fonction épuratrice des ZH vers des milieux de traitement semi-naturels positionnés en amont. Par une sélection des cohortes végétales locales au potentiel épurateur, les processus de rétention et de dégradation des polluants seront optimisés au sein de ces systèmes tampons, dans l'objectif de réduire en amont les apports de polluants aux milieux naturels et de favoriser ainsi la résilience des espèces sensibles à la pollution. Avant d'entamer la phase de tests *in situ*, nous avons étudié en conditions contrôlées les réponses physiologiques de cinq macrophytes natifs du site expérimental (*Alisma lanceolatum*, *Carex cuprina*, *Epilobium hirsutum*, *Iris pseudacorus*, *Juncus inflexus*) sous contrainte de multi-pollution organique et métallique. Cette expérimentation nous a permis de montrer que les différents cocktails de contaminants ont des effets sur le développement des plantes qui varient en fonction des espèces, des polluants et des concentrations. Ces cinq espèces végétales indicatrices des variations de la pollution d'un point de vue qualitatif et quantitatif pourront donc être utilisées conjointement en tant qu'outils de biosurveillance au sein des systèmes de phytoépuration, en complément des analyses physico-chimiques.

# L'utilisation de macrophytes en tant que bioindicateurs de l'efficacité épuratoire : un outil permettant d'évaluer les démarches de biomimétisme relatives à la phytoépuration

Anna Guittonny-Philippe<sup>1,2</sup>, Julien Viglione<sup>2</sup>, Véronique Masotti<sup>1</sup>, Isabelle Laffont-Schwob<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IMBE équipe Biotechnologies et Bioremédiation, UMR CNRS 7263 / IRD 237, Aix-Marseille Université ; <sup>2</sup> ECO-MED (Ecologie- Médiation)

## CONTEXTE :

Bassin versant industrialisé situé en amont d'une zone humide d'intérêt communautaire (Marais des Paluns, 13)

Rejets chroniques d'eaux pluviales et de process en respect des seuils réglementaires (arrêté du 2 février 1998)

## Effets cumulatifs :

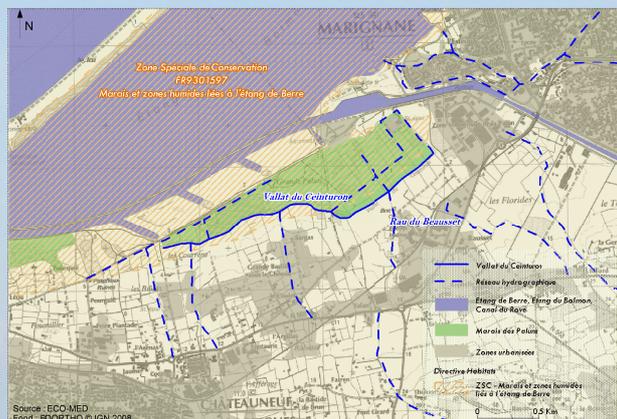
**Dans l'espace :** Additivité des rejets à l'aval du bassin versant / synergies entre les polluants : phénomène accentué en milieu méditerranéen (cours d'eaux temporaires)

**Dans le temps :** Accumulation des polluants dans les sédiments du milieu aquatique récepteur

Toxicité pour le milieu naturel (perte de biodiversité)



Dégradation des ressources en eau (risque sanitaire)



Site expérimental : Contexte hydrographique et occupation des sols

## OBJECTIF DU PROJET ECO-PHYT :

Délocaliser la fonction épuratrice de la zone humide naturelle impactée par des pollutions chroniques d'origine anthropique vers un milieu humide construit et optimisé positionné en amont

**PROBLEMATIQUE :** Dans ce contexte, les suivis physicochimiques sont peu adaptés pour évaluer et suivre l'efficacité épuratoire :

Beaucoup de contaminants / concentrations faibles

Effets synergiques / chronicité

Contraintes analytiques

Quelle toxicité pour le milieu naturel ?

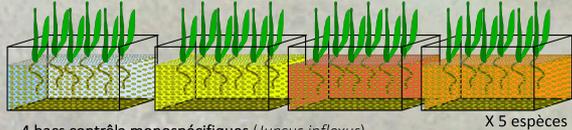
=> Besoin de bioindicateurs pour évaluer les bénéfices de la démarche sur la biodiversité du milieu aquatique récepteur

## MISE AU POINT D'UN OUTIL DE BIODIPLICATION DE L'EFFICACITE EPURATOIRE PAR L'UTILISATION DE 5 MACROPHYTES AUTOCHTONES DU MARAIS DES PALUNS

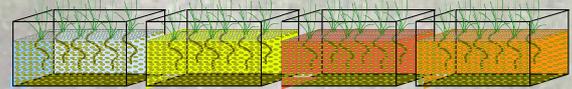
## MATERIELS ET METHODES :

32 bacs (contenance : 22kg de pouzzolane, 13L de solution) dont :

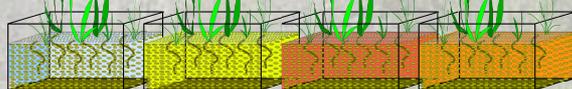
20 bacs test monospécifiques (*Alisma lanceolatum*, *Iris pseudacorus*, *Epilobium hirsutum*, *Carex cuprina*, *Juncus inflexus*)



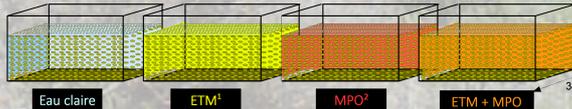
4 bacs contrôle monospécifiques (*Juncus inflexus*) X 5 espèces



4 bacs contrôle multispécifiques



4 bacs contrôle non plantés



Eau claire, ETM<sup>a</sup>, MPO<sup>b</sup>, ETM + MPO

<sup>a</sup> Éléments en traces métalliques : Fe, Pb, Al, Zn, Cu, Ni, Cd, As, Mn, Sn, Cr

<sup>b</sup> Micropolluants organiques : phénanthrène, pyrène, hydrocarbures (C10-C40), solvants (acétone, dichlorométhane), détergent industriel

<sup>c</sup> Ajout des solutions contrôlées contenant les polluants aux concentrations de rejets réglementaires (arrêté du 2 février 1998)

<sup>d</sup> Ajout des solutions contrôlées contenant les polluants aux concentrations de rejets réglementaires x 10 (faux pour les solvants et le détergent)

Contaminant	Pb	Cu	Cr	Ni	Zn	Mn	Sn	Fe	Al	Cd	As	HCT(C10-C40)	Pyrène	Phénanthrène
Concentration réglementaire (mg/l) (arrêté du 2/02/1998)	0,5	0,5	0,5	0,5	2	1	2	2,5	2,5	0,2	0,05	10	0,05	0,05

### Conduite des mesures :

Dosages des polluants dans l'eau, le substrat et les plantes

### Niveau de test et suivi des plantes :

Parties aériennes : relevés biométriques (hebdomadaires) et mesures non destructives de biomarqueurs de stress (bi-mensuelles)

Parties aériennes et racinaires : mesures biométriques et de biomasse à T0 et Tfinal ; dosages des protéines de stress à Tfinal

**CONCLUSION :** En puisant dans la biodiversité naturelle un ensemble d'espèces végétales indicatrices des variations de la pollution d'un point de vue quantitatif et qualitatif, il est possible d'évaluer autrement l'efficacité épuratoire de la zone humide artificielle tampon.

## RESULTATS :

Les multi-pollutions organique et/ou métallique entraînent des signes visuels de toxicité différents en fonction des espèces, des polluants et des concentrations

### Résultats du test chronique :

Aucun signe de toxicité n'a été observé sur les plantes des 5 espèces de macrophytes dans les bacs pollués par rapport aux bacs contrôle non pollués

### Résultats préliminaires des tests aigus :



**Alisma lanceolatum :** Accélération de la sénescence des feuilles et précocité de la floraison dans les bacs contenant des polluants par rapport au bac contrôle



**Epilobium hirsutum :** Apparition de chloroses et de nécroses sur les feuilles dans les bacs contenant des métaux par rapport au bac contrôle



**Juncus inflexus :** Sénescence des feuilles à terminaison piquante dans le bac contenant des métaux par rapport au bac contrôle



**Iris pseudacorus :** Retard de croissance des parties aériennes dans les bacs contenant des micropolluants organiques par rapport au bac contrôle



**Carex cuprina :** Aucun signe visuel de toxicité dans les bacs pollués par rapport au bac contrôle

Multiplication végétative

9/02/2012



Acclimatation

20/03/2012



Test chronique<sup>c</sup>

24/04/2012



Test aigue<sup>b</sup>

29/05/2012



Test aigue<sup>b</sup>

9/07/2012

Récolte

## S'inspirer de la coopération plantes - micro-organismes pour réhabiliter les friches industrielles : le potentiel des espèces natives pour la phytostabilisation

**Alma Heckenroth<sup>1,2</sup>, Jacques Rabier<sup>1</sup>, Isabelle Laffont-Schwob<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> UMR CNRS 7263 / IRD 237, IMBE, Aix-Marseille Université, équipe Biotechnologies et Bioremédiation, 3 place Victor Hugo case 4, 13331 Marseille

<sup>2</sup> OGD Ortec Générale de Dépollution, 13799 Aix-en-Provence

Les sites de production et de transformation de minerais constituent une source de pollution en éléments traces métalliques et métalloïdes (ETMM) qui, en l'absence de réhabilitation, persiste dans le temps et l'espace même après l'arrêt des activités. La phytoremédiation est considérée comme une alternative intéressante aux techniques de dépollution de sol conventionnelles, ces dernières étant plus coûteuses et lourdes en terme d'impacts sur l'environnement. Elle possède également l'avantage de favoriser la revégétalisation d'anciens sites miniers, permettant ainsi de réduire le risque sanitaire en limitant la dissémination des ETMM par l'érosion. En milieu méditerranéen pollué, le stress hydrique et les concentrations élevées en ETMM forment une double contrainte à l'établissement de la végétation. La compréhension des interactions sol-métaux-plantes-microorganismes, le choix des espèces natives utilisées et des amendements sont donc essentiels pour garantir le succès d'une opération de phytoremédiation. Sur le littoral marseillais, l'ancien site industriel de l'Escalette est une source de pollution par les ETMM pour l'ensemble des compartiments environnementaux. La particularité de ce site est qu'il est constitué d'une mosaïque de paysages urbains et naturels, comprenant une zone d'habitation et qu'il s'inscrit dans le périmètre du cœur du Parc National des Calanques. Au cours des dernières années, des travaux de recherches menés sur le site de l'Escalette ont mis en avant les potentialités des espèces locales et de leurs symbioses mycorhiziennes et rhizobiennes pour la phytostabilisation des sols pollués. La démarche menée dans le cadre de cette thèse consiste en l'étude des communautés végétales qui se sont développées sur des zones contaminées par les ETMM afin de sélectionner des plantes et leurs micro-organismes associés pour leurs capacités phytostabilisatrices. En parallèle, des expérimentations sont menées *ex* et *in situ* pour mieux appréhender les paramètres biotiques et abiotiques améliorant la phytostabilisation des ETMM par les espèces natives.

# S'inspirer de la coopération plante-micro-organismes pour réhabiliter les friches industrielles : le potentiel des espèces natives pour la phytostabilisation

Alma Heckenroth<sup>1,2</sup>, Jacques Rabier<sup>1</sup>, Isabelle Laffont-Schwob<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IMBE équipe Biotechnologies et Bioremédiation, UMR CNRS 7263 / IRD 237, Aix-Marseille Université ; <sup>2</sup> OGD Groupe ORTEC



Figure 1 : Localisation du site d'étude



Figure 2 : Vue de la friche industrielle

## Contexte

Ancienne fonderie de plomb argentifère en cœur du Parc National des Calanques (Marseille, 13)

Pollution en éléments traces métalliques et métalloïdes (ETMM) → sol, stériles, cendres

Transfert de pollution à l'ensemble des compartiments biotiques et abiotiques

Problème de santé publique [InVS 2007]

## Objectif

Evaluer les méthodes de phytoremédiation adaptées à la restauration de cette friche industrielle en s'appuyant sur le fond floristique local et ses micro-organismes symbiotiques/associés

En l'absence de réhabilitation, la pollution de cette friche industrielle continue à se disperser dans l'ensemble des compartiments environnementaux du site et des alentours. Cette ancienne fonderie constitue ainsi un risque important pour la santé humaine des habitants et usagers du site. De ce constat émerge la nécessité d'agir sur les transferts des ETMM en respectant les exigences écologiques d'un territoire dans le périmètre du Parc National des Calanques.

Ainsi, la phytostabilisation constitue une solution alternatives aux méthodes de dépollution classiques, plus coûteuses et lourdes en terme d'impacts environnementaux. Elle permet d'établir un couvert végétal à long terme qui limite l'érosion mécanique de l'eau et du vent et de stabiliser les ETMM dans les racines et la rhizosphère par l'action combinée des plantes et des micro-organismes.

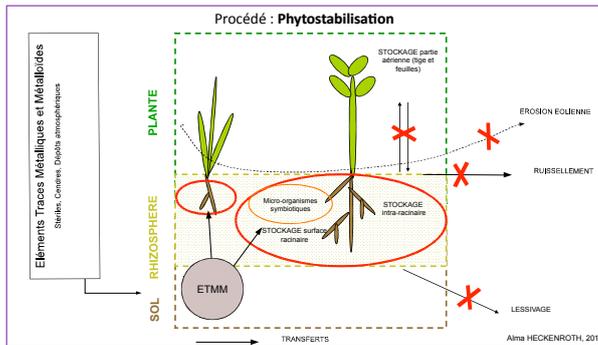
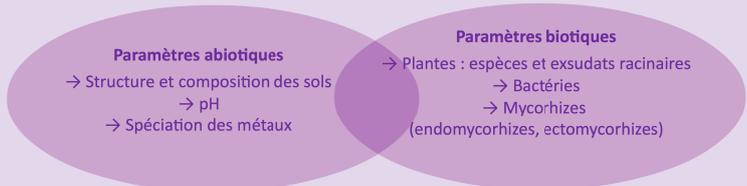


Figure 3 : Principe de la phytostabilisation des ETMM

Au niveau de la rhizosphère, la mobilité des ETMM est contrôlée par une combinaison de paramètres abiotiques et biotiques qui interagissent les uns sur les autres et possèdent une variabilité spatiale pouvant être importante.



L'étude et la compréhension de ces différents paramètres est donc essentielle pour être en mesure d'optimiser les conditions de la rhizosphère et immobiliser efficacement les ETMM (Mench *et al* 2009\*)

Zoom sur les micro-organismes rhizosphériques

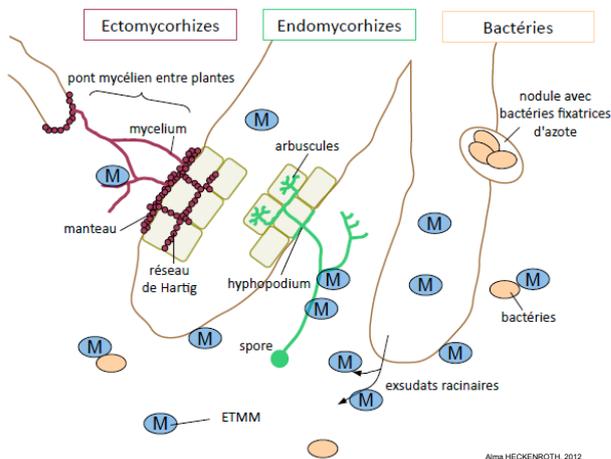
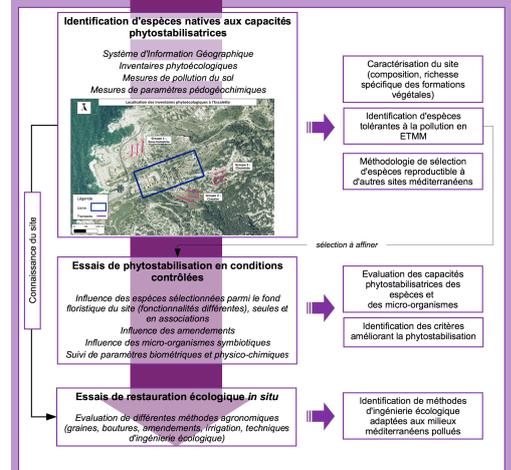


Figure 4 : Interactions plante-micro-organismes au niveau de la rhizosphère et des racines et effets sur la stabilisation des ETMM

## Influence des paramètres biotiques sur la phytostabilisation des ETMM

- Exsudats racinaires**
  - Précipitation
  - Complexation
  - Stimulation de l'activité des microorganismes
- Racines**
  - Absorption
  - Accumulation
  - Précipitation en surface
- Mycorhizes**
  - Augmentation de la surface d'échange racinaire
  - Accumulation
  - Rôle de filtre pour les éléments absorbés par la plante
- Bactéries**
  - Précipitation des ETMM
  - Favorisent la croissance des plantes (Plant-Growth-Promoting-Bacteria)

## Démarche expérimentale :



### Partenaires thèse CIFRE

OGD groupe ORTEC  
IMBE  
ANRT

### Autres acteurs du projet

DREAL PACA  
ADEME  
Parc National des Calanques  
CG13  
Propriétaires privés  
Riverains / usagers  
Mairie de Marseille

## Les mutualismes insectes sociaux / microorganismes : une stratégie bio-inspirée pour la recherche de nouveaux composés antibiotiques et cytotoxiques

**Charlotte Nirma, Véronique Eparvier, Didier Stien**

UPR CNRS 2301, Institut de Chimie des Substances Naturelles, Bât. 23B, 1 avenue de la Terrasse, 91190 Gif-sur-Yvette

Aujourd'hui, des maladies nouvelles, réurgentes et redéployées sont devenues des forces de changement de dimension planétaire. L'apparition de bactéries pathogènes multirésistantes et l'augmentation globale des cas d'affections bactériennes ont induit la recherche de nouveaux composés bioactifs antibactériens. Dans ce travail, notre objectif principal est d'isoler et de caractériser des composés à activité antibactérienne, antifongique et/ou anticancéreuse à partir de microorganismes symbiotiques de colonies d'insectes sociaux, dont il est raisonnable de postuler au regard des données de la littérature qu'ils contribuent à la protection des colonies contre les maladies infectieuses. Par ailleurs, notre objectif secondaire est de démontrer par l'isolement de ces composés bioactifs que le mutualisme microorganismes – insectes sociaux n'est pas uniquement fondé sur l'échange de nourriture mais aussi sur des mécanismes de protection mutuelle. Cette étude commence donc par un travail de collecte sur le terrain. Les microorganismes sont isolés à partir des échantillons récoltés (insectes, habitat). Les souches pures de microorganismes sont cultivées en milieu solide à partir duquel on extrait les métabolites secondaires. Le potentiel antimicrobien des métabolites est alors testé par un criblage biologique (test quantitatif MIC) sur différents pathogènes humains. Les extraits sont également testés sur des lignées cellulaires cancéreuses. Les extraits présentant des résultats positifs lors du criblage sont fractionnés par bioguidage, et la structure des molécules actives est déterminée par RMN et spectrométrie de masse.

# Les mutualismes insectes sociaux – micro-organismes : Une stratégie bio-inspirée pour la recherche de nouveaux composés antibiotiques et cytotoxiques

Nirma C., Eparvier V., Stien D.

ICSN-CNRS, Bât. 23B, 1 avenue de la Terrasse, 91190 Gif-sur-Yvette

## INTRODUCTION

Avec pour objectif de découvrir de nouveaux composés anti-infectieux et cytotoxiques, nous nous sommes intéressés aux symbioses insectes sociaux-micro-organismes. En effet, d'après la littérature, les micro-organismes contribueraient à la protection des colonies d'insectes contre les maladies infectieuses.<sup>1,2</sup> Plusieurs composés antibiotiques ont été isolés de micro-organismes symbiotiques des fourmis,<sup>3</sup> mais aucune étude n'a été effectuée sur les termites, qui sont également des insectes sociaux.



## Matériels et méthodes

Les micro-organismes sont isolés à partir de termites collectés en Guyane française. Les souches pures de micro-organismes sont cultivées sur milieu solide, à partir duquel on extrait les métabolites secondaires à l'acétate d'éthyle. Le potentiel antimicrobien et cytotoxique des extraits est alors testé par un criblage biologique sur différents pathogènes humains (test quantitatif CMI) et sur des lignées cellulaires cancéreuses.



## Résultats

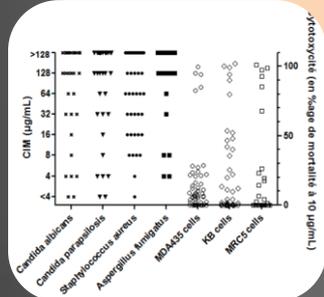
10 termitières collectées

121 micro-organismes isolés, identifiés, cultivés puis extraits

### Criblage biologique

9 extraits de micro-organismes actifs

Fractionnement bioguidé  
Purification des composés

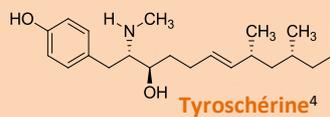


## Activités cytotoxiques

IC<sub>50</sub> (µg/mL)

	KB	MRC5	MDA435
Tyroschérine	1.09	1.06	2.53
N-Méthyl-tyroschérine	2.18	1.80	3.32

## Composés bioactifs



## Activités antimicrobiennes

Composé	Concentration Minimale Inhibitrice (µg/mL)					
	<i>C. albicans</i> (ATCC 10231)	<i>C. parapsilosis</i>	<i>A. fumigatus</i>	<i>T. rubrum</i>	<i>E. coli</i> (ATCC 25922)	<i>S. aureus</i> (ATCC 29213)
Tyroschérine	2	16	16	2	16	8
N-Méthyl-tyroschérine	4	32	32	4	32	16
Fluconazole <sup>a</sup>	4	4	-	-	-	-
Itraconazole <sup>a</sup>	-	-	0.5	0.25	-	-
Gentamycine <sup>a</sup>	-	-	-	-	8	-
Oxacilline <sup>a</sup>	-	-	-	-	-	0.5

## CONCLUSION

Notre étude des mutualismes insectes sociaux – micro-organismes nous a permis de mettre en évidence l'activité de certains symbiontes sur des pathogènes humains et certaines lignées cellulaires cancéreuses. Dans l'exemple proposé, 2 composés bioactifs ont été isolés du champignon *Pseudallescheria boydii*, lui-même isolé d'un termite du genre *Nasutitermes*.

Cette stratégie bio-inspirée se révèle prometteuse dans la découverte de nouveaux composés bioactifs en santé humaine, issus d'une ressource facilement exploitable et renouvelable, les micro-organismes.

<sup>1</sup> Stow A., Beattie A. *Brain, Behaviour and Immunity* 2008, 22, 1009-13.

<sup>2</sup> Berembaum M.R., Eisner T. *Science* 2008, 322, 52-3;

<sup>3</sup> Currie C. R., Scott J. A., Summerbell R. C., Malloch D. *Nature* 1999, 398, 701-704.

<sup>4</sup> Hayakawa Y., Yamashita T., Mori T., Nagai K., Shin-Ya K., Watanabe H. *The Journal of Antibiotics* 2004, 57, 634-638.

<sup>a</sup> Contrôles positifs

## Mécanisme de dissémination des graines de l'*Erodium cicutarium* et son application potentielle pour l'exploration du sous-sol

**Camilla Pandolfi<sup>1</sup>, Diego Comparini<sup>2</sup>, Stefano Mancuso<sup>2</sup>, Dario Izzo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Advanced Concepts Team, European Space Research and Technology Centre, Keplerlaan 1, 2201 AZ Noordwijk, Pays-Bas

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze delle Produzioni Vegetali, del Suolo e dell'Ambiente Agroforestale, Università degli Studi di Firenze, Viale delle Idee 30, 50019 Sesto F.no Firenze, Italie

Les plantes *Erodium cicutarium* L. dispersent leurs graines en combinant deux stratégies de dispersion différentes : la dispersion balistique et la dispersion par auto-enfouissement. Alors que les fruits sèchent, les contraintes développées dans la structure peuvent provoquer la séparation soudaine des graines qui vont s'envoler loin de la plante. Une fois au sol, les graines réagissent à des variations d'humidité de l'environnement extérieur : leur unité de dispersion est hélicoïdale lorsque le temps est sec et linéaire lorsque l'humidité est élevée. Le cycle jour-nuit de l'humidité résulte en un mouvement d'enroulement et de déroulement qui déplace la graine sur toute la surface et jusque dans le sol. La présente étude vise à obtenir une connaissance plus approfondie de la stratégie de dissémination des graines de l'*Erodium cicutarium* L. avec pour objectif la mise en œuvre, dans des structures mécaniques, de cette capacité de réponse passive aux variations de paramètres externes tels que la lumière, la température ou l'humidité.



# Self-burial mechanism of *Erodium cicutarium* and its potential application for subsurface exploration

Camilla Pandolfi<sup>1</sup>, Diego Comparini<sup>2</sup>, Stefano Mancuso<sup>2</sup>, and Dario Izzo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Advanced Concepts Team, European Space Research and Technology Centre, Noordwijk, The Netherlands. [www.esa.int/act](http://www.esa.int/act)

<sup>2</sup> Department of Plant, Soil and Environmental Science, University of Florence, Italy [www.linv.org](http://www.linv.org)  
[camilla.pandolfi@esa.int](mailto:camilla.pandolfi@esa.int)

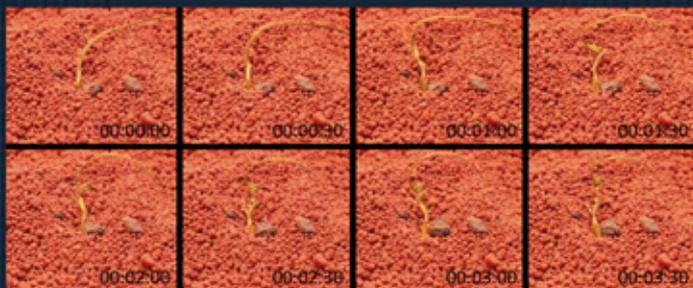
*Erodium cicutarium* L. plants disperse their seeds using a very peculiar dispersal strategy: the self-burial dispersal. As the fruits dry, the stresses developed in the structure cause the sudden separation of the seeds that fly away from the plant. Then, once on the ground, the seeds respond to variations in the external humidity and coil and uncoil accordingly.

The worldwide and abundant presence of *Erodium* clearly underlines the importance of its simple but effective mechanism by exploiting a natural source of energy such as the humidity-cycle occurring during day-night changes.

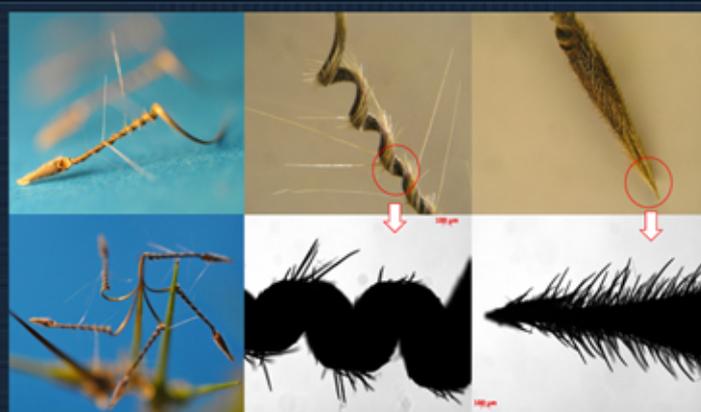
The present study aims at getting a deeper insight into the self-burial strategy of *Erodium* in order to implement this ability into mechanical structures that relying on changes in the external parameters (such as light, temperatures or humidity) can achieve passively the same goal.



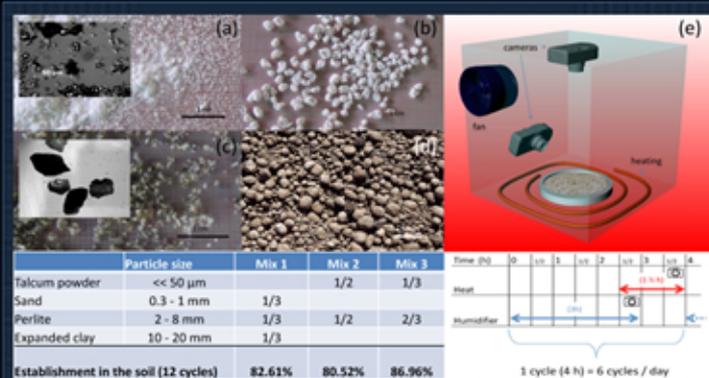
Each seed has a dispersal unit (the awn) that respond to variations in the external humidity and change its configuration accordingly: the awn is helical when dry and linear when wet. The day-night cycle of humidity results in a coiling and uncoiling motor action that moves the seed across the surface and into the ground.



The winding and unwinding movement of the tail allows the seed to move over the surface seeking strategy for cracks or bigger rocks. When the head of the seed finds an obstacle that prevents its further sliding, the tail works as a lever and its rotation allows the seed to penetrate the soil like a screw.



Long hairs are aligned to the awn when straight and become perpendicular when coiled, this place the seed at an angle of 15-20 degrees to the soil. The seed-head is covered with sharp barbs that increase the friction and prevent the seed to move backwards during the unwinding phase.



In order to evaluate the contribution of gravitational force on the overall establishment of the seed into the soil, we tested different soil mix obtained by the combination of 4 light weight materials: talcum powder (a), perlite (b), sand (c) and expanded clay (d). The experimental set-up is shown in (e), and the two tables summarize the mix composition, the percentage of establishment achieved and the wet-dry cycles.



*Erodium*-inspired space probes could represent a brand new generation of planetary robotic drillers and contribute to the acquisition of fundamental information on the history of planets and in the search of extraterrestrial life.

Understanding the contribution of gravity to the drilling performance is fundamental to extend the application to asteroids. "Rubble pile" asteroids could be an interesting target. They are weak aggregates of large and small components held together by gravity rather than material strength, and the seeking and drilling strategy of the seed could be extremely successful on them.

References:  
 Nancy E. Stamp (1984) Self-Burial Behaviour of *Erodium Cicutarium* Seeds *Journal of Ecology*, Vol. 72, No. 2 (Jul., 1984), pp. 611-620  
 Nancy E. Stamp (1989) Efficacy of Explosive vs. Hygroscopic Seed Dispersal by an Annual Grassland Species *American Journal of Botany*, Vol. 76, No. 4 (Apr., 1989), pp. 555-561  
 Evangelista et al. (2010) The mechanics of explosive dispersal and self-burial in the seeds of the filaree, *Erodium cicutarium* (Geraniaceae) *The Journal of Experimental Biology* 214, 521-529  
 Abraham et al. (2011) Tilted cellulose arrangement as a novel mechanism for hygroscopic coiling in the stork's bill awn *J. R. Soc. Interface* August 2011.  
 Aharoni et al (2012) Emergence of Spontaneous Twist and Curvature in Non-Euclidean Rods. *PHYSICAL REVIEW LETTERS* DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.238106



## *Tragopogon dubius* : considérations de biomimétique

**Camilla Pandolfi, Vincent Casseau, Dario Izzo**

Advanced Concepts Team, European Space Research and Technology Centre, Keplerlaan 1, 2201 AZ Noordwijk, Pays-Bas

Le *Tragopogon dubius* est une petite plante herbacée qui utilise le vent comme vecteur de dispersion pour ses graines. Les graines sont attachées à des parachutes pédonculés qui augmentent la force de traînée aérodynamique sur les graines. Cela a pour effet de diminuer la vitesse de descente des graines et d'augmenter la longueur totale de chute. Le parachute naturel du *Tragopogon dubius* est un modèle d'étude idéal pour le développement d'une structure biomimétique en raison de la taille relativement importante de ce dernier, de sa structure robuste et solide et de la distribution hiérarchique de ses fibres. Le présent travail décrit quelques résultats préliminaires sur les propriétés structurales et le comportement aérodynamique de ces graines dans le but de développer de nouveaux concepts de parachutes légers ou robustes pour d'éventuelles explorations extraterrestres.



# Tragopogon dubius, considerations on a possible biomimetic transfer

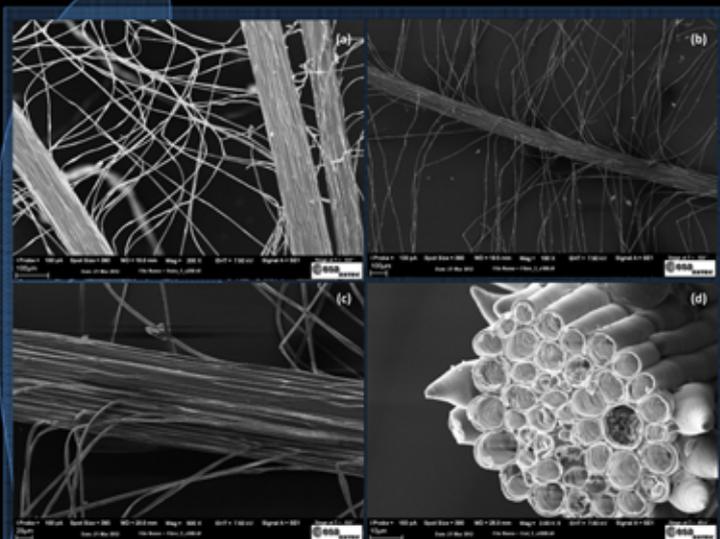
Camilla Pandolfi, Vincent Casseau, Terence Pei Fu, Dario Izzo

Advanced Concepts Team, European Space Research and Technology Centre, Keplerlaan 1, Noordwijk The Netherlands  
[camilla.pandolfi@esa.int](mailto:camilla.pandolfi@esa.int), <http://www.esa.int/act>

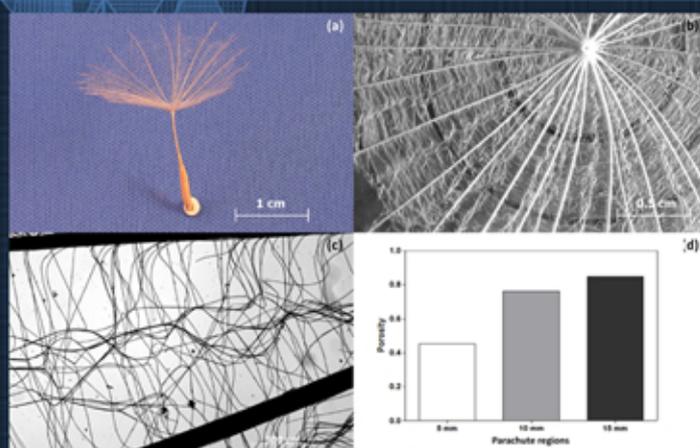
Dispersal of seeds away from the parental plant is very important to reach new habitats and to survive in changing environmental conditions. For these reasons, plants invest in a variety of strategies to exploit the most abundant form of energy available (i.e. wind).

*Tragopogon dubius* provides its seeds with probably the biggest parachute available in nature.

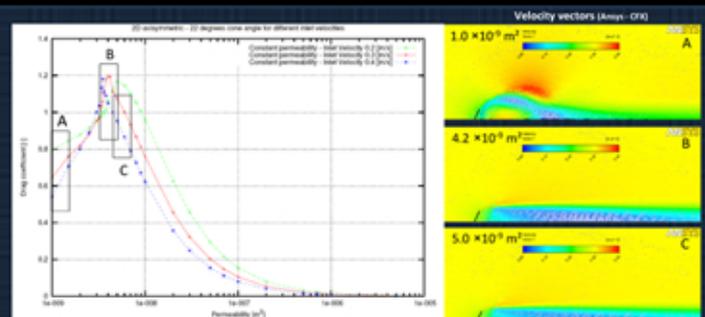
In a windy atmosphere, for a low wind speed, vertical descent velocity remains a good indicator of the horizontal flight capacity of the seed, but an increase of wind will result in an exponential increase of the horizontal dispersal distance [1]. In an attempt to predict the terminal velocity of the seeds, drop experiments revealed unexpected results [2]. Which encouraged us to perform a more thorough investigation on the seed aerodynamics. Our results revealed some advantageous properties which were previously unnoticed.



SEM (Scanning Electron Microscope) images showing details of the parachute: the primary hairs are made of a bunch of small fibres which detach gradually creating a fine net - the secondary hairs - (a-c). The fibres are hollow tubes to get a light weight structure (d).

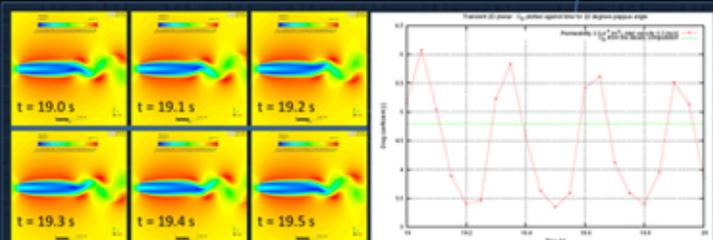


Characterization of the natural parachute (a). The surface was divided into three regions identified according to their distance from the centre. From the scanned images (b) and optical inverted microscope (c), we calculated the porosity for the three regions as follow:  
 $Porosity = 1 - (\text{area of the projected disk}) / (\text{area occupied by fibers})$



Effect of cone's permeability on drag coefficient ( $C_D$ ) and velocity flow-field for different inlet velocities.

The CFD simulations of a 2D axisymmetric cone revealed a peak in the drag coefficient in a range of permeability. An increase in permeability from case (A) results in a shift of the vortex behind the parachute, up to a point where the recirculation starts to disappear (B). This configuration is the one which gives the highest drag coefficient. A further increase in permeability yields to a regular flow downstream and thus to a decrease in drag coefficient (C) as the flow has a higher ability to pass through the fibres.

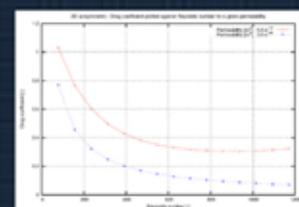


2D transient computations for a planar section of the cone.

The computations reveal the appearance of vortex shedding after 14s. The phenomenon becomes periodic (period  $T=0.6s$ ) after 19s, forming a Von Kármán street. The drag coefficient is plotted for this simulation. It oscillates with a period  $T/2$ , as the x-axis is an axis of symmetry for the flow-field. The value obtained with a steady simulation is fairly close to the mean value with a transient computation.

Reynolds number (for a solid body):  
 $Re = V \cdot L / \nu$

with:  $V$  [m/s] - freestream velocity  
 $L$  [m] - characteristic length of the body  
 $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] - air kinematic viscosity



2D steady computations for an axisymmetric cone -  $C_D = f(Re)$ .

The graph denotes that the drag coefficient is highly dependant on the Reynolds number for the range [100 ; 400] at different values of permeability.

[1] M. McGinley and E. Brigham (1989). Fruit morphology and terminal velocity in *Tragopogon dubius* (L.). *Functional Ecology*, vol. 3, 489 - 496.

[2] J. Hensen and C. Muller (1997). Experimental and structural investigations of anemochorous dispersal. *Plant Ecology*, vol. 133, 169 - 180.





**Commissariat général au développement durable**

Direction de la recherche et de l'innovation

Tour Voltaire

92055 La Défense cedex

Tél : 01.40.81.21.22

Retrouver cette publication sur le site :

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/developpement-durable>

## Résumé

Sous l'impulsion du Commissariat général au développement durable et du Muséum national d'Histoire naturelle, chercheurs et doctorants, industriels, représentants d'associations et élus se sont réunis le 10 décembre 2012 pour débattre sur le thème « recherches bio-inspirées : une opportunité pour la transition écologique ? ».

Cette journée d'échanges, rassemblant près de deux cents participants, invitait à réfléchir sur les « réponses » possibles de la démarche bio-inspirée aux multiples défis du développement durable. Quatre séries d'exposés, deux tables-rondes et une « exposition posters » ont permis aux participants de jauger et d'interroger le potentiel d'innovation soutenable de certains travaux de recherche bio-inspirés dans des domaines aussi divers que la chimie, l'ingénierie des matériaux, la physique, l'agronomie et la mécanique.

En rappelant la place féconde que peut occuper l'analyse des phénomènes naturels dans la création et la maturation de concepts scientifiques et techniques, l'initiative a conforté la pertinence d'un dialogue structuré et pérenne entre spécialistes du vivant et scientifiques d'autres champs du savoir au service de trajectoires novatrices de recherche et développement.



Dépôt légal : juillet 2013  
ISSN : 2102-474X