

MENS

MILIEU EDUCATION NATURE SOCIÉTÉ

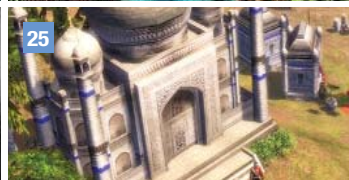
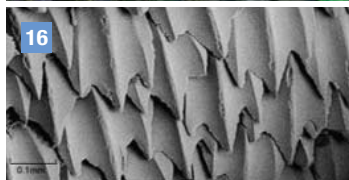
57

Revue scientifique populaire
Trimestrielle | OCT-NOV-DÉC 2012

Biomimétisme

la nature comme inspiration
du génie humain

La conception de la vie	5
3,85 milliards d'années de technologie adaptative	5
Pour survivre, il faut évoluer	6
Agir efficacement	6
S'adapter lorsque changent les conditions préalables	8
Le développement va de pair avec la croissance	9
Nous appartenons à notre environnement	11
Utiliser une chimie respectueuse de la vie	12
Au travers du miroir du biomimétisme	13
Les cristaux de dioxyde de titane grandissent à l'aide de diatomées	13
Au plus profond de la mer	15
Comment la nature peut-elle nous apprendre à compter	18
L'évolution biologique résout des questions informatiques	20
Algorithmes génétiques	20
Compter avec les fourmis et avec l'ADN	23
De la génétique à l'informatique à domicile ?	25
Pour terminer	25



© 2012 Bio-MENS asbl

MeNS est une édition de l'asbl Bio-MENS.
A la lumière du modèle de société actuel, elle considère une éducation scientifique objective comme l'un de ses objectifs de base.

www.biomens.eu

Coordination académique

Prof. Dr. Roland Caubergs, UA
roland.caubergs@ua.ac.be

Rédacteur en chef et rédaction finale

Dr. Ing. Joeri Horvath, UA
joeri.horvath@ua.ac.be

Rédaction centrale

Lic. Karel Bruggemans
Prof. Dr. Roland Caubergs
Dr. Guido François
Prof. Dr. Geert Potters
Dr. Lieve Maesele
Lic. Els Grieten
Lic. Chris Thoen
ir. Marjolein Vanoppen
ir. Ariane Ooms
Prof. Dr. Diane Van Strydonck

Coordination communication Bio-MENS

Kaat Vervoort
Herrystraat 8b, 2140 Antwerpen
Tél. +32 (0)3 609 52 30
Fax +32 (0)3 609 52 37
contact@biomens.eu

Coordination

Dr. Sonja De Nollin
Tél. +32 (0)495 23 99 45
sonja.denollin@ua.ac.be

Abonnement

Kaat Vervoort
Herrystraat 8b, 2140 Antwerpen
kaat@biomens.eu

Conception et mise en page

Peter Faes - www.odevie.com
Uitgeverij Acco



In memoriam Crista van Haeren

(6 mars 1954 – 21 août 2012)

Un départ peut être décrit comme une sorte de rester.

Personne n'attend parce que tu es encore là.

Personne ne dit au revoir parce que tu ne pars pas.

- Rutger Kopland -

À notre grande tristesse, notre chère présidente Crista van Haeren nous a quittés le 21 août 2012. Tous ceux qui l'ont connue vivent ce départ comme un drame. C'était un privilège de pouvoir la fréquenter. Sa sympathie, son humour, sa beauté intérieure et extérieure et sa gratitude toujours si grande, même pour les petites choses, étaient tellement caractéristiques. Sa force tranquille était impressionnante. Nous la pleurons, pour qui elle était et ce qu'elle représentait pour nous.

Crista a lutté contre un monstre impitoyable. Malheureusement, c'était un combat qu'elle n'a finalement pas pu gagner. Elle est restée sereine et lucide, comme toujours. Elle n'a jamais baissé les bras. Elle ne s'est jamais plainte, aussi difficile que soit sa situation.

Elle avait étudié la biologie à l'Université de Gand. Elle y était aussi devenue docteur en sciences. Par la suite, elle avait effectué des recherches à l'Institut de Médecine Tropicale. Au début des années 1990, elle a été nommée à l'Institut National de Criminalistique et Criminologie (INCC), département Drogues et Toxicologie. Ces dernières années, son engagement sur la scène internationale était énorme. Elle s'était impliquée dans l'ENFSI, réseau européen des instituts forensiques.

La contribution de Crista pour Bio-MENS était très importante. Elle a tout d'abord été trésorière, puis présidente. En 2010, elle a écrit un numéro de MeNS (46) qui correspondait étroitement à sa propre expé-

rience en forensique. C'est une véritable perle de rigueur et de compétence. Et cette combinaison lui était aussi très caractéristique. En septembre 2012, un numéro (56) a été édité sur le cancer. Il lui est implicitement dédié. Elle en a pesé le pour et le contre du texte et a donné son approbation au résultat final. Malheureusement, elle n'a plus été en mesure de participer au moment de la publication.

En hommage à Crista, nous plaidons ici en faveur d'une recherche plus coordonnée contre le cancer. Aussi importants que soient les efforts actuels en la matière, nous n'apercevons pas encore la fin du tunnel. Les résultats sont notamment répartis de manière inégale entre les différents domaines. Nous avons besoin de projets ciblés, bénéficiant d'un financement suffisant et cadrant dans une collaboration internationale synergétique entre des scientifiques, des oncologues et des experts en pharmacologie et en biotechnologie. Nous devons ainsi faire face à des cancers 'difficiles' comme le cancer des poumons. La recherche se doit d'apporter des résultats pratiques efficaces de manière urgente.

Chère Crista, nous te pleurons, mais nous garderons pour toujours dans notre cœur ta chaleur et ton doux sourire. Nous te sommes éternellement reconnaissants pour tout ce que tu nous a donné.

Guido François, son conjoint
La Rédaction centrale de MeNS
Le Conseil d'administration de Bio-MENS vzw

Biomim

la nature comme inspiration du génie humain

Dossier composé par le Prof. Dr Geert Potters (École supérieure de navigation & Université d'Anvers), Prof. Dr Kris Laukens (Université d'Anvers) et Ludwig Callaerts (ActUA & Université d'Anvers).

La nature vivante. Une source de détente pour le promeneur et le cycliste. Une source de plaisir pour l'amateur d'oiseaux qui parcourt les champs les jumelles à la main. Pour le fan de snorkeling qui savoure la splendeur des coraux. Pour l'artiste à la recherche d'une muse qui convienne à sa plume ou son pinceau.

Et d'autre part, il y a les spécialistes des sciences de la vie qui veulent pénétrer la beauté de la nature et les secrets de son organisation. Ils sont également animés par leur passion et leur créativité sans limites.

Mais l'intérêt de l'homme pour la nature ne s'arrête pas là. Les ingénieurs, architectes, développeurs de produits et même les informaticiens (voir plus loin) examinent aussi avec toujours plus d'insistance les exemples du monde vivant pour s'attaquer efficacement aux problèmes auxquels ils sont confrontés dans leur travail. Cette manière de penser, nous l'appelons biomimétisme. L'homme reproduit en effet la nature vivante (bios, 'vie' et mimesis, 'imitation'). D'autres termes utilisés sont la 'biomimétique' (il s'agit alors surtout d'exemples chimiques) et la 'bionique' (qui supposait au départ un lien avec l'électronique).



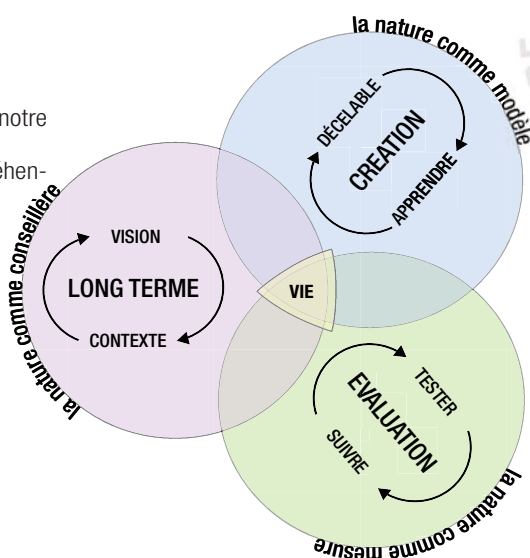
Eastgate Centre, Harare, Zimbabwe : La conception de ce centre commercial et immeuble de bureaux est un bel exemple de biomimétisme dans l'architecture : comme dans une termitière, le refroidissement et le chauffage de ce bâtiment sont entièrement régulés par le design complet. Ce centre ne consomme que dix pour cent de l'énergie dont a besoin un bâtiment 'normal' de la même taille. Foto Harare : David Brazier, Wikipedia

biomimétisme

Foto Yun, yunphoto.net

pourquoi ?

- changement de notre façon de penser
- meilleure compréhension du contexte



pourquoi ?

- plus d'idées
- nouvelles idées
- respectueux de la nature
- testé et prouvé
- belles et élégantes idées

pourquoi ?

- Recherche de limites et d'opportunités
- que (ne) ferait (pas) la nature ?

La nature sert ici de modèle, de conseillère et de mesure de toutes choses. Qu'entendons-nous par là ?

- **MODÈLE** : nous étudions les exemples de solutions ingénieuses à des problèmes dans la nature (processus, systèmes, stratégies). Ainsi, nous arrivons dans la première partie de ce dossier à six principes généraux pour la conception, comme le fait la nature. Nous étudierons ces six principes et ce qu'ils signifient, et nous les illustrerons à chaque fois avec un certain nombre d'exemples émanant de la nature. Nous espérons dès lors que ces principes pourront constituer une base de départ pour tous ceux qui veulent se laisser inspirer par la nature pour se mettre au travail avec le concept de biomimétisme, pour des découvertes personnelles et pour concevoir.
- **CONSEILLÈRE** : en étudiant ainsi la nature, elle n'est plus simplement une source pour toutes sortes de matériaux, mais plutôt un exemple à partir duquel nous pouvons apprendre. Notre propre conception se veut le reflet de processus naturels et nous cherchons comment nous pouvons ainsi améliorer notre propre travail. Nous effectuerons un périple nous menant à différentes nouvelles découvertes et conceptions qui sont encore à l'étude ou qui sont déjà pleinement disponibles et sont appliqués dans l'industrie. Nous étudierons de manière approfondie comment la biologie a également inspiré l'informatique.



*We are expression of earth, and of life –
not separate individuals only.*

*We cannot get enough away from the earth
to see the earth and ourselves as separates.*

*We move with its great movements and
our growth is part of its great growth.*

(Khalil Gibran, Mary Haskell's Journal, 5 mai 1922).



<http://www.youtube.com/v/JnBkbaFsZOY&fs=1&source=uds&autoplay=1>

Mimétisme

Pour le biologiste de formation classique et le passionné de la nature, le mimétisme indique que des plantes et des animaux imitent d'autres organismes. Il s'agit d'une forme de camouflage, grâce auquel certains organismes veulent être reconnus comme un autre organisme (et il ne s'agit pas de se cacher). Ce faisant, ils veulent paraître plus dangereux qu'ils ne le sont en réalité ou ils veulent ne pas se faire remarquer comme une proie délicieuse. Les ophrys en sont un exemple typique. Ils attirent les insectes en ressemblant à une espèce de leur espèce. D'autres exemples sont les syrphidés qui imitent les guêpes, de grands ocelles sur les ailes des papillons et la couleuvre faux-coraïl non venimeuse qui se pare des mêmes couleurs vives que le serpent corail qui est quant à lui extrêmement dangereux.

Mais bien que ce sujet soit très intéressant, il n'est pas couvert par ce dossier. Dans cette revue, nous traitons des manières mises en œuvre par l'homme pour imiter la nature lorsqu'il conçoit, ébauche, invente et développe. Et en ce qui nous concerne, nous ne le faisons pas pour éviter de ressembler à une délicieuse proie, ni pour avoir l'air encore plus dangereux que nous ne le sommes...

- MESURE : nos solutions doivent aussi s'intégrer dans cette nature et satisfaire donc à une norme durable, écologique. Sur ce dernier point, vous avez déjà pu lire beaucoup dans le MēNS 42 (Chimie verte, à télécharger sur www.biomens.eu). Nous réservons également une place dans ce numéro pour d'autres sujets.

De cette manière, le biomimétisme a évolué d'un ensemble d'idées et d'exemples intéressants à une façon de vivre, une philosophie : lorsque la nature a déjà testé quelque chose pendant des milliers d'années, elle doit alors aussi avoir trouvé les meilleures façons de gérer tout processus, de le faciliter ou de l'optimiser. Cette façon de vivre (apprendre de la nature - imiter la nature - protéger ainsi la nature de façon durable), nous aimerions la transmettre aux lecteurs de MēNS... comme présentation, et chez beaucoup peut-être comme une manière identifiable de penser et de vivre.



Serpent corail (Micrurus tener) John, Wikipedia



Couleuvre faux-coraïl (Lampropeltis triangulum annulata) CDC, Wikipedia

La conception de la vie

3,85 milliards d'années de technologie adaptative

Dès le moment où les premières molécules organiques sont apparues sur terre (dans la dite soupe originelle) jusqu'au jour d'aujourd'hui, la vie a fait l'objet d'une multitude de bricolages. Et nous nous parlons pas ici d'un concepteur en bleu de travail qui manipule une grande pince multiprise. Nous laissons en effet cette image à la théorie religieuse antérieure du dessein intelligent (voir MeNS 40).

En effet, la vie sur terre était déjà à cette époque sujette à un processus sans cesse récurrent de variations, essais, modifications et sélections rigoureuses en fonction des conditions qui dominaient notre planète. Ce processus, que nous connaissons comme le mécanisme de l'évolution que Charles Darwin a décrit, se déroulait déjà il y a quatre milliards d'années, et il se poursuit encore aujourd'hui invariablement.

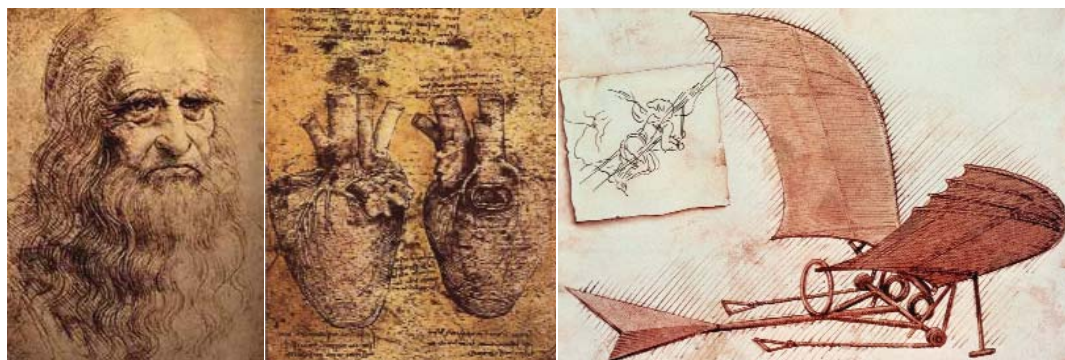
Les scientifiques supposent que de cette manière, toutes les formes de vie sur terre, aujourd'hui comme par le passé, sont finalement apparentées les unes aux autres, et ont ensemble leur place dans un grand arbre généalogique de la diversité. Cette



Leonardo Da Vinci – L'homme de vitruve

diversité est clairement régie par un certain nombre de principes de base généraux. Toutes ces formes de vie partagent en effet un système similaire de transmission d'informations (ADN et ARN), utilisent des sources similaires d'énergie et sont constituées des mêmes types de molécules organiques (protéines, graisses). En même temps, cette diversité a permis à la vie de se répandre en pratiquement tous les endroits possibles de la planète, et de résister à des tsunamis, des éruptions volcaniques, des impacts de météorites et des périodes glaciaires.

Cela signifie-t-il que toutes les espèces et formes de vie individuelles aient perduré jusqu'à aujourd'hui ? Bien au contraire : 99,9% de toutes les formes de vie ayant un jour existé sur notre planète ont disparu (voir MeNS 24 et 49). Ces espèces ne satisfaisaient pas à court ou à long terme aux conditions générales d'un séjour prolongé sur la planète bleue. Et le contrôle de qualité de la SA Vie Sur Terre est sans pitié : quiconque ne satisfait pas, disparaît définitivement.



Leonardo Da Vinci était un des premiers à étudier le fonctionnement de la nature, et à appliquer ses vues dans ses conceptions (par ex. cet avion).

Par ailleurs, cela signifie également que beaucoup de principes et exemples de conception ont été amplement testés dans la nature. Plus un certain principe est souvent appliqué, plus on peut être sûr qu'il s'agit d'un principe solide. Les chercheurs du Biomimicry Institute et de la Biomimicry Guild (Gilde de la biodiversité) résument ces principes comme suit...

Principe 1 : Pour survivre, il faut évoluer

Ce qui est branché un jour est dépassé la semaine suivante. Les solutions d'aujourd'hui ne sont plus celles de demain. Les organismes doivent sans cesse se renouveler et s'adapter pour continuer à satisfaire aux exigences que leur écosystème, leur monde leur imposent. Les bactéries du sol développent toujours de nouvelles formes d'antibiotiques à mesure que d'autres organismes développent des mécanismes (également par évolution) pour rendre les variétés existantes inoffensives ou les supporter. Les fleurs développent des structures spécialisées, des formes, des odeurs et des couleurs pour attirer les pollinisateurs. L'homme renouvelle constamment ses propres inventions : une voiture aujourd'hui a une ligne très différente de la voiture de 1920.

De nouvelles stratégies pertinentes sont de préférence transmises aussi vite que possible et appliquées ailleurs. Les animaux apprennent par exemple certains modèles de comportement les uns des autres : les

jeunes oiseaux apprennent les mélodies de leur propre espèce de leurs parents et les chats apprennent à leurs petits à chasser des souris. En outre, surviennent de temps en temps des changements (par mutation) qui semblent être étonnamment avantageux.

Les hommes également font parfois des découvertes fortuites. Des inventions qui n'ont pas exactement satisfait aux objectifs initiaux trouvent parfois une toute autre application. L'exemple par excellence dans ce cas est la colle utilisée pour les petits papiers Post-it. Cette substance a été développée dans le cadre d'une recherche d'un type de colle super puissant. Clairement un raté donc si l'on considère l'objectif original. Toutefois, cette substance une fois apposée sur le petit bout de papier jaune aujourd'hui bien connu s'est avérée être un best-seller.

Principe 2 : Agir efficacement

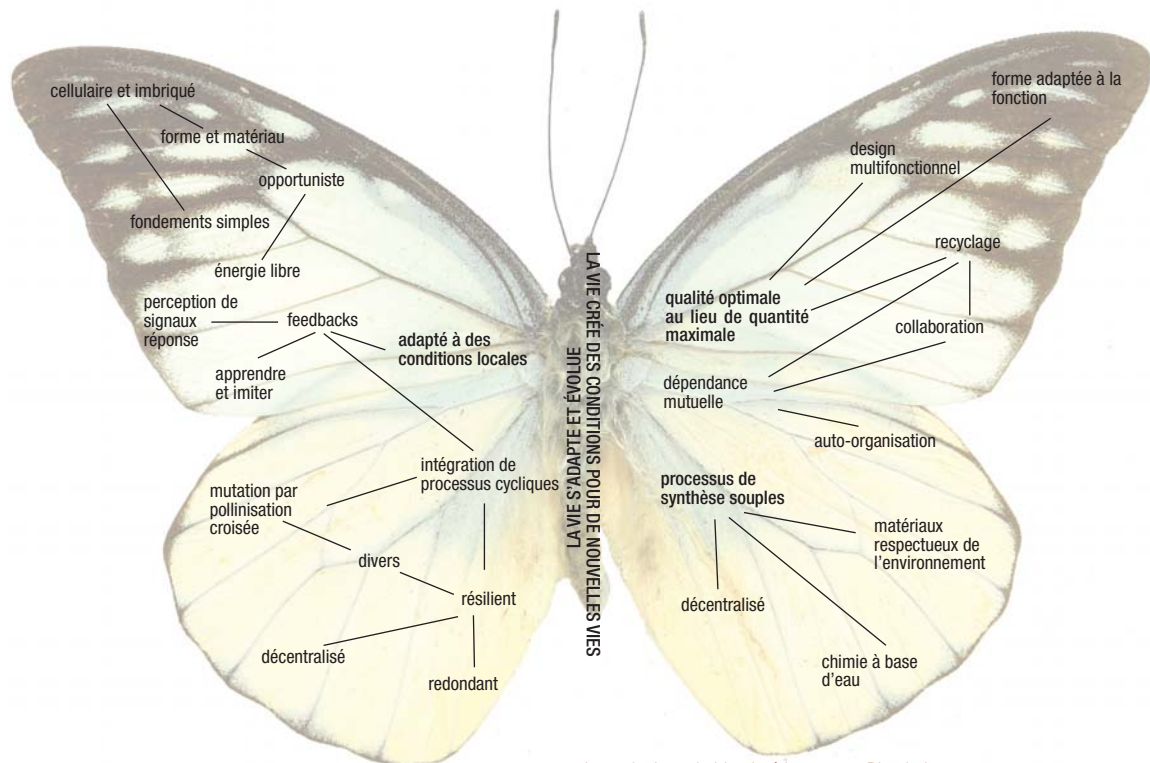


Dans la nature, rien n'existe en suffisance que pour pouvoir servir chacun en abondance : énergie, nutriments, minéraux, etc. ne sont pas inépuisables. Celui qui se conduit envers ces réserves de la manière la plus économe sera bien vu des autres. Lorsqu'une tige creuse est suffisante, comme les tiges de bambou, la plante ne fabrique pas de cellules supplémentaires pour en remplir encore le cœur. Les os des oiseaux sont également creux : ils combinent ainsi l'avantage d'une structure solide à celui d'un faible poids.



Post-it : aujourd'hui aussi comme expression artistique.

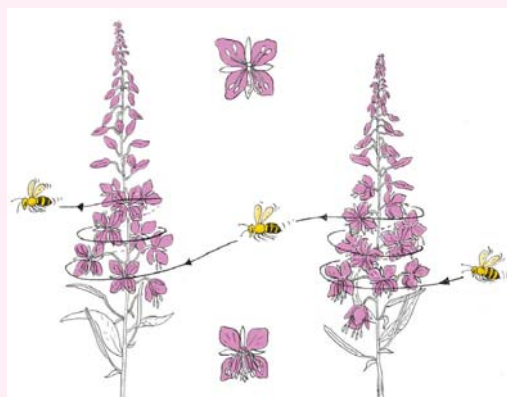




Les principes de biomimétisme - sur Biomimicry.net

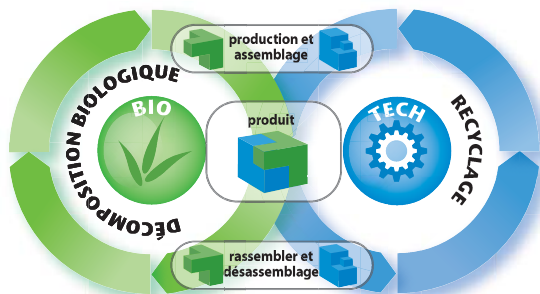
Les éléments idéaux sont ceux qui remplissent plusieurs fonctions à la fois. Nous pouvons aussi le constater dans notre propre vie : le four combiné micro-ondes, le robot de cuisine, la tablette informatique et les téléphones portables modernes sont tous des exemples d'appareils que l'on peut utiliser dans différentes circonstances et à différentes fins. La maison passive en est également un exemple (voir MeNS 36) : sa structure et son orientation rafraîchissent en été, mais réchauffent aussi en hiver.

Utiliser efficacement l'énergie, la nourriture et les matières signifie également que nous devons recycler. Dans la nature, il n'existe rien de pareil aux déchets : ce qui constitue des déchets pour un organisme est utilisé par un autre organisme pour sa propre croissance et son développement. Ainsi, la majeure partie de l'oxygène que produisent les plantes représente pour elles un sous-produit, mais les animaux, les moisissures et la plupart des bactéries utilisent ce gaz comme base pour leur approvisionnement énergétique. Les animaux morts sont décomposés en leurs composantes moléculaires et minérales. Les grandes molécules polymères comme les protéines et l'ADN sont décomposées en leurs



Coévolution de l'épilobe

Visite d'une fleur d'épilobe par une abeille mellifère. La plante fleurit de bas en haut. L'abeille visite tout d'abord les fleurs les plus basses de l'épi. Ce sont celles qui sont ouvertes depuis le plus longtemps et elles se trouvent dans la phase féminine. Les stigmates mûrs reçoivent le pollen d'un autre spécimen. L'abeille finit par les fleurs les plus hautes, qui ne sont en fleur que depuis peu et se trouvent dans la phase masculine. Les étamines déposent le pollen sur l'abeille. Celle-ci s'envole avec vers les fleurs inférieures féminines d'une autre plante.



Le concept 'cradle to cradle' (du berceau au berceau) de William McDonough et Michael Braungart est peut-être le concept le plus élaboré du biomimétisme à grande échelle. Il n'y a plus de déchets : tout sert à nouveau de matière première pour un autre processus industriel. En outre, les matériaux biologiques restent clairement séparés des matériaux technologiques : deux cycles se déroulent en parallèle.



Banane, inflorescence et fruit

éléments constitutifs (monomères), respectivement, des acides aminés et des nucléotides. Tous ces produits issus de la décomposition servent ensemble de matériau de construction pour de nouveaux organismes. Le malheur des uns fait le bonheur des autres. Dans le monde des humains, c'est par ailleurs un concept innovant : 'cradle to cradle' (voir MeNS 42).

Les êtres vivants présentent enfin des formes efficaces. Dans la nature, la forme d'un organe ou un organisme et la fonction de celui-ci vont de pair. Les poissons ont une forme idéale et sont bâtis pour se déplacer rapidement et de façon hydrodynamique dans leur environnement (voir plus loin). Les fleurs adaptent leur forme, leur odeur et leur couleur en fonction des pollinisateurs qu'elles veulent attirer (voir la figure).

Principe 3 : S'adapter lorsque changent les conditions préalables

La nature est constamment en évolution, et celui qui veut survivre doit évoluer avec elle. Ce principe est déjà expliqué plus haut. Mais celui qui veut s'adapter doit aussi pouvoir être en mesure de le faire. La me-

sure dans laquelle un organisme ou une espèce peut survivre en des temps difficiles et renaître est appelée résilience.

Pour survivre, les êtres vivants utilisent leur plasticité. Nous entendons par là leur puissance à s'adapter. Pour ce faire, ils comptent sur leurs congénères, qui disposent de certaines variantes en termes de propriétés. Ils vont utiliser autrement des éléments existants, des versions mutantes d'un certain gène augmentent les chances de survie, certains génotypes rares deviennent plus importants pour l'espèce. Plus la diversité présente au sein d'une espèce est grande, et plus les différentes variétés sont liées les unes aux autres ou en contact les unes avec les autres, mieux c'est. En guise de contre-exemple : les plants de bananes commerciaux sont des clones les uns des autres : ils comportent exactement les mêmes informations génétiques. Ce fait présente un gros inconvénient : lorsqu'une moisissure ou un virus s'abat sur la plantation, il n'y a pas un seul plant en mesure de se défendre mieux que les autres. Ce fait découle de l'absence de diversité. En raison de l'absence de différence entre les plantes, elles sont toutes aussi faibles. Elles sombrent donc toutes.





Outre la diversité, certaines propriétés font également l'objet de redondance. Autrement dit, il existe plusieurs formes, exemplaires... du même élément. Ainsi, pour les principales protéines dans notre métabolisme (les protéines dont nous avons besoin pour notre ménage énergétique par exemple), il existe différents gènes correspondants. Si une partie de notre cerveau est endommagé, d'autres zones du cerveau peuvent reprendre les fonctions perdues après un certain entraînement. On pourrait même dire que la production de centaines de milliers de descendants par chaque couple de poissons quelconque constitue une forme de redondance, mais alors sur une échelle écologique : étant donné qu'ils sont si nombreux, il subsiste une chance réelle que quelques-uns des descendants resteront suffisamment longtemps en vie que pour pouvoir à leur tour frayer.

Principe 4 : Le développement va de pair avec la croissance

Observez-vous ou observez un enfant en pleine croissance de votre entourage : non seulement les personnes grandissent pendant leur jeunesse, mais pendant ce processus, elles changent également de forme et de proportions. C'est encore plus clair sur



Animaux dans leur vie commune : la somme représente plus que les éléments ensemble.



Modules dans le développement des plantes

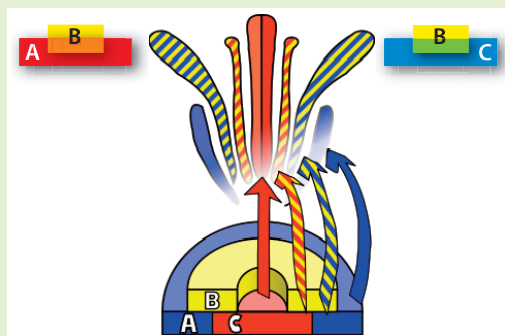
Voulez-vous découvrir par vos propres yeux comment les différentes parties de la fleur sont toutes des variantes d'un même module ? Quelques variantes de plantes mutantes suffisent pour le voir. Pour commencer, elles nous apprennent que seuls quelques gènes sont nécessaires pour attribuer à une partie de fleur la bonne forme et la bonne identité. Pour plus de facilité, nous désignons ces gènes par les lettres a, b et c.

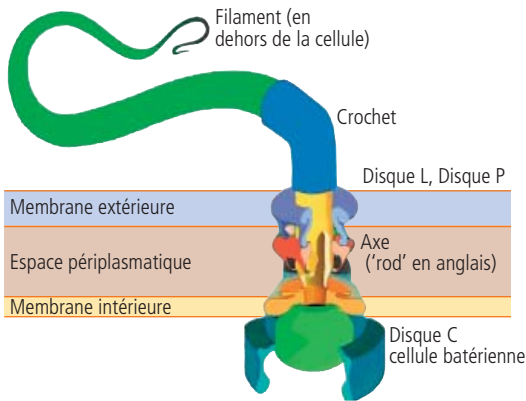
Une fleur se compose de différents cercles concentriques. Sur ceux-ci sont implantées les différentes parties de la fleur. Ces cercles correspondent aux endroits où les gènes a, b ou c sont actifs, ou comme on l'appelle, l'endroit où ces gènes s'expriment. Sur le disque extérieur, les sépales, seul le gène a s'exprime. À l'intérieur, se trouvent les pétales, qui puisent leur identité dans les gènes a et b. L'expression des gènes b et c conduit à l'étamine. Si seul le gène c est actif, au milieu, alors un pistil s'y développe.

Une plante qui est mutante au niveau du gène b a donc uniquement des disques où le gène a est actif et des cercles où le gène c est actif. Cette plante a des sépales supplémentaires à l'endroit où on attend des pétales. Imaginez par vous-même ce à quoi ressemblerait une plante avec un gène mutant a ou c ...

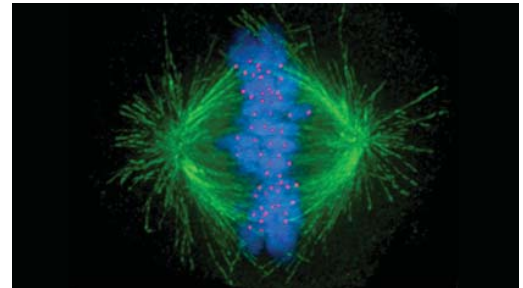
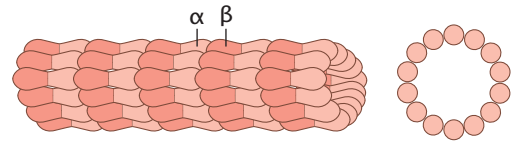


Mutant agamous dans le gène C *Mutant apetala2 dans le gène A*





Structure du flagelle d'une bactérie



Microtubules : au-dessus : structures à 2 types de protéines (α et β) ; en dessous : MT en action lors de la division cellulaire

d'autres organismes. Pensez notamment à la métamorphose de nombreux insectes, une graine qui germe, ou un petit têtard qui devient une grenouille. Et les changements qui transforment un ovule en un bébé humain sont encore plus spectaculaires.

La nature travaille souvent avec différents modules au sein d'un même organisme, qui chacun peut présenter un autre comportement ou une autre esthétique. Des exemples en ce sens sont les segments d'un ver de terre (qui se ressemblent les uns les autres pour la majeure partie), ou les entre-nœuds d'une plante découpée, comme le bambou (voir MeNS 55). D'autres plantes aussi se composent de différents modules : les feuilles successives sur une tige, conjointement avec la partie intermédiaire de cette tige. Lorsqu'une tige développe finalement une fleur, ces modules feuille-tige continuent d'exister. La tige est bien extrêmement raccourcie et la feuille change en un sépale, un pétale, ou même une étamine ou un pistil.

En travaillant avec des éléments qui se répètent, la nature épargne de l'énergie et du temps. En outre, ces éléments sont souvent en mesure de constituer avec d'autres éléments semblables une structure plus grande, qui représente plus que la somme des éléments individuels. C'est ce que nous appelons l'auto-organisation, ou, s'il s'agit d'une structure qui est construite, auto-assemblage.

Quelques exemples :

- De nombreuses molécules dans des êtres vivants sont des polymères. Les monomères (corps simples) se composent en outre d'un certain élément basique et une partie variable. De cette façon, l'unité cellulaire se maintient dans la diversité : unité parce que la construction de ces polymères à partir de la bonne espèce de monomères est un processus simple, diversité parce que les monomères eux-mêmes dans leur partie variable peuvent prendre différentes formes. Pensez encore aux vingt acides aminés différents dans des protéines naturelles, ou aux quatre nucléotides qui constituent notre ADN.
- Les protéines qui ensemble composent le flagelle d'une bactérie s'adaptent les unes aux autres et veillent à constituer un dispositif propulseur qui fonctionne pour la cellule de la bactérie.
- Les protéines tubulines α et β s'emboîtent l'une dans l'autre et composent ainsi les microtubules dans nos cellules. Les microtubules sont de longues structures tubulaires qui servent comme une sorte de réseau de métro : via ces microtubules, de petites vésicules sont transportées vers d'autres endroits dans la cellule. Par ailleurs, elles servent également de câbles lors de la division des chromosomes pendant la mitose.
- Les lipides dans nos cellules sont constitués de manière à ce qu'ils forment par eux-mêmes une membrane biologique, présentant les bonnes propriétés.



- Les maladies telles que celle de Creutzfeldt-Jacob ou l'encéphalopathie spongiforme bovine (ESB, mieux connue sous le nom de la vache folle) sont causées par des prions. Ces protéines sont nuisibles pour deux raisons : elles transforment des protéines semblables, non nuisibles dans notre système nerveux et notre cerveau en une version nuisible. Par ailleurs, elles se rassemblent en flocons par auto-assemblage pour former ce que l'on appelle les plaques amyloïdes. Celles-ci affectent l'activité cérébrale.
- Le fait que des cellules, organes, organismes,... maintiennent leurs systèmes internes en équilibre – on parle ici d'homéostasie – est également une forme d'auto-organisation. Pensez ici notamment à la température corporelle constante des animaux à sang chaud. Ou encore aux hormones insuline et glucagon qui sont séparées par les îlots de Langerhans (pancréas) et qui maintiennent la bonne quantité de sucre dans notre sang. De même, l'existence de communautés plus ou moins structurées chez certaines espèces représente aussi une forme d'auto-organisation. Les abeilles et les fourmis sont des exemples d'espèces affichant une communauté de vie parfaitement structurée (voir MeNS 51), et les bancs de poissons ou les troupes d'éléphants en font également partie.
- Si l'on en croit le célèbre écologiste James Love-

lock, la terre tout entière représente un écosystème ininterrompu qui tend à conserver un équilibre planétaire.

Principe 5 : Nous appartenons à notre environnement

Les êtres vivants s'adaptent à l'endroit où ils vivent (leur habitat), et le rôle qu'ils jouent dans leur écosystème (leur niche). Ils sont ainsi formés par des centaines de milliers d'années d'évolution (et même plus), et ils peuvent s'adapter aux caprices de leur environnement. Pour ce faire, ils utilisent ce qui est disponible dans ce même environnement. Ils utilisent aussi leurs propres possibilités, présentes dans l'empreinte génétique de l'organisme. Exemples tirés du monde des humains : l'utilisation de cellules solaires (énergie produite localement) au lieu de carburants fossiles qui doivent venir de loin, ou le fait de construire avec des essences de bois locales et des types de pierres locaux. Vous vous demandez pourquoi nous ne les utilisons pas encore davantage ...

Ce pouvoir d'adaptation est facilité par le fait que la nature change souvent et de manière cyclique et prévisible : jour et nuit, les saisons, les marées. Des fleurs apparaissent aux bons moments, des arbres laissent



Certains animaux s'adaptent lorsque leur environnement change : les caméléons et leur couleur, le pelage des animaux polaires

BESOIN DE PLUS D'INSPIRATION ENCORE ?

Janine Benyus : Douze idées de conception durable puisées dans la nature, à voir et à écouter sur www.youtube.com/watch?v=n77BfxnVlyc
brainz.org/15-coolest-cases-biomimicry/
www.biomimicrynl.org
www.biomimicry.net



tomber leurs feuilles en automne aux



hibernent lorsqu'il commence à faire froid. Les êtres vivants y sont d'ailleurs déjà bien habitués : nous expérimentons même constamment dans notre vie quotidienne des cycles de faim, sommeil, activité sexuelle, stimuli hormonaux ... Nous les appelons des rythmes endogènes.

En outre, différents organismes s'adaptent en même temps. Ils peuvent ainsi collaborer de manière optimale avec d'autres organismes dans leur environnement. En effet, la nature va encourager la collaboration plutôt que d'autoriser la compétition.

Principe 6 : Utiliser une chimie respectueuse de la vie

La chimie est la base de la vie - vous pouviez déjà le



lire dans le MeNS 10. Si nous voulons prendre exemple sur la chimie vivante, il est préférable de n'utiliser aucune substance ou méthode susceptible de mettre en danger cette même vie. Qu'est-ce que cela signifie dans la pratique ?

Tout d'abord, l'eau n'est jamais très loin. L'eau est le solvant pour un grand nombre de réactions et de processus en chimie biologique. Les membranes des cellules et les tissus sont composés de lipides et ne se dissolvent donc pas dans l'eau ; elles assurent en effet la présence d'éléments structuraux. Mais même ces membranes contiennent une couche extérieure hydrophile et sont donc encore toujours conçues pour agir comme interface avec des systèmes aqueux.

La chimie de la vie se déroule à la température corporelle. Plus encore : des changements minimes au niveau de la température peuvent déjà être mortels (une personne ne survit pas très longtemps à une fièvre de plus de 42 degrés). Quel contraste avec les températures élevées requises par l'industrie pour la synthèse des molécules même les plus simples !

La biochimie évite aussi l'utilisation de substances dangereuses. Certains enzymes utilisent encore des ions zinc-cuivre pour accomplir leurs réactions ; le plomb et le cadmium, deux métaux lourds extrêmement nocifs qui apparaissent souvent dans la chimie humaine (industrielle - voir figure) n'interviennent absolument pas dans des circonstances naturelles dans le métabolisme cellulaire des bactéries, des moisissures, des animaux ou des plantes.

Si pourtant l'un ou l'autre organisme fabrique une substance toxique, celle-ci disparaît souvent aussi vite

Un exemple de conséquences de chimie peu respectueuse du monde vivant est la petite ville roumaine de Copsa Miga. Les cheminées de l'usine sidérurgique de Sometra émettent depuis de longues années déjà des nuages de métaux lourds toxiques qui se répandent ensuite sur la ville. Les habitants les absorbent lorsqu'ils mangent des légumes en provenance de leur propre jardin. Même en cas de visite occasionnelle à Copsa Miga, les personnes sensibles subissent une gêne au niveau pulmonaire. Et l'espérance de vie dans la région ne se situe qu'aux alentours des cinquante ans. Photo Chantal Maas.



qu'elle n'a été produite ; généralement, il n'en existe en outre que des quantités minimales (juste assez qu'il n'est strictement nécessaire). Prenez à présent le venin de serpent avec lequel une proie est morte. Avant que le serpent n'ait entièrement digéré la proie, le poison est déjà décomposé.

Quel est le message au cœur de tout cela ? Janine Benyus, une des pionnières du mouvement du biomimétisme, déclare : 'Après 3,8 milliards d'années d'évolution, la nature a déjà parfaitement étudié ce qui fonctionne, ce qui convient, et ce qui est durable dans le milieu terrestre.' Il est temps donc d'utiliser davantage ces connaissances.

Au travers du miroir du biomimétisme

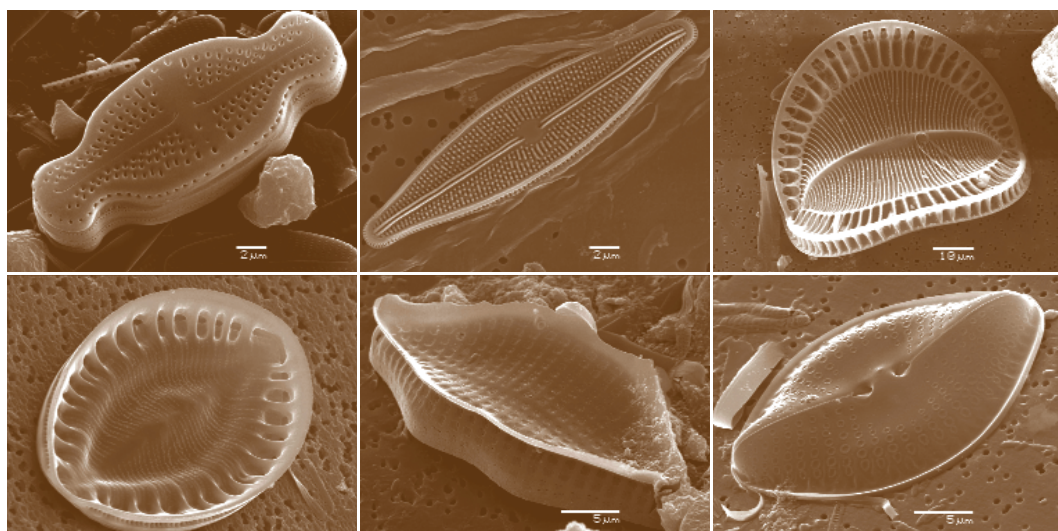
Au cours de l'évolution, la nature a souvent imaginé des solutions très sensées pour résoudre les défis auxquels la technologie de l'homme d'aujourd'hui se retrouve également confrontée. Nous pouvons apprendre beaucoup en regardant autour de nous comment les êtres vivants s'adaptent aux exigences de leur environnement, et comment ils dévoilent toutes sortes de manières ingénieuses pour survivre. La nature est un exemple, un maître - nous prenons exemple sur ses réalisations et essayons de les imiter dans nos propres conceptions.



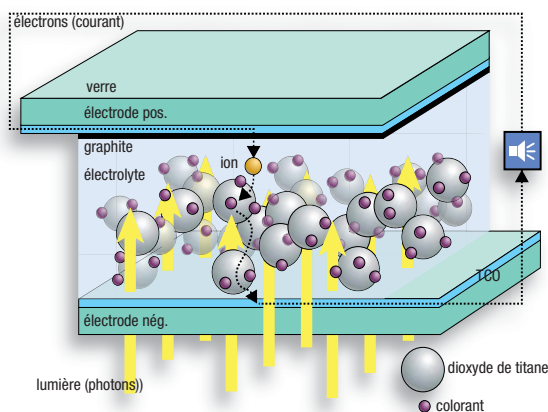
Alice au travers du miroir

Les cristaux de dioxyde de titane grandissent à l'aide de diatomées

Un des matériaux ayant fait l'objet d'une grande attention ces dernières années est le dioxyde de titane (TiO_2). Il ne s'agit pas uniquement d'un composant important de toutes sortes de peintures, des scientifiques ont découvert que cette matière peut faire office de catalyseur : sa surface peut par exemple aider lors de la décomposition de différentes formes de pollution de l'air. Différentes substances contenues dans les gaz d'échappement des voitures sont



Diatomées, avec petites coquilles... SiO_2 . Bientôt une aide pour lutter contre la pollution de l'air ? Photos Bart Van de Vijver



Le TiO_2 est également utilisé dans les cellules solaires à colorant (également appelées cellules de Graetzel). Dans ces cellules, des colorants transforment la lumière en courant électrique. Tout comme dans la nature du reste : la chlorophylle sert en effet d'énergie pour transformer l'énergie de la lumière du soleil en énergie pour les cellules végétales. Encore un exemple de biomimétisme. Une belle séquence vidéo sur Youtube montre qu'il ne faut pas uniquement utiliser la chlorophylle et inspirera, nous l'espérons, de nombreux bricoleurs parmi le public MeNS...

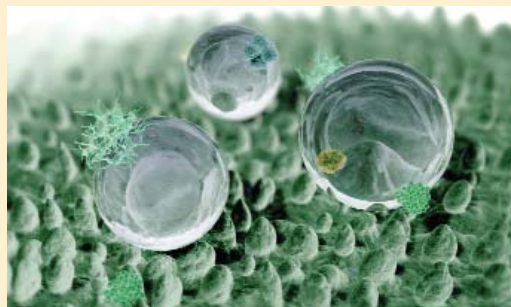
<http://www.youtube.com/watch?v=WHTbw5jy6qU>

Seriez-vous d'avis par ailleurs qu'il ne s'agit que d'un bricolage sur le côté ? Que ça n'a rien de comparable avec la valeur économique des panneaux solaires bien connus ? Dans ce cas, pensez un peu différemment. La firme australienne Dyesol essaie de lancer cette technologie sur le marché et gagne pas mal d'argent ce faisant. www.dyesol.com



Rester au sec avec la peinture de lotus

Plus une peinture recouvre les matériaux sous-jacents et les protège contre l'eau, mieux c'est. Pensez notamment aux clôtures en bois, aux coques de navires et aux murs de caves inondées : tous affrontent mieux la pluie, l'eau de mer et l'humidité grandissante s'ils sont recouverts d'une couche de peinture. Dans le meilleur des cas, l'eau n'adhère pas du tout à la surface. Ce genre de surfaces existent également dans la nature, notamment au niveau des feuilles de la fleur de lotus. Leur secret ? Une microstructure hydrophobe (imperméable) unique. La surface d'une feuille de la plante de lotus est recouverte d'une multitude de petites hernies microscopiques. Celles-ci veillent à ce que les gouttes d'eau qui tombent sur cette feuille y restent en tant que gouttes séparées et se chargent en même temps de la saleté à la surface de la feuille. Les gouttes d'eau roulent facilement en dehors de la feuille et emportent la saleté.



Gouttes sur une feuille de lotus

De cette façon, tout reste parfaitement sec sous la surface. Des chercheurs de différentes entreprises ont développé des couches de revêtement de protection et des peintures qui adhèrent à ce principe. Stocorp a lancé une peinture hautement résistante à l'eau qui offre aussi directement une solution pour les moisissures, la saleté et même les rayons UV. Lotus Leaf Coatings aux États-Unis a développé une couche de protection pour les téléphones portables. Même après 20 minutes d'immersion dans l'eau, l'appareil continue de fonctionner (regardez vous-même sur la vidéo). Enfin une lueur d'espoir pour tous ceux qui voient régulièrement leur appareil tomber dans l'eau !

Plus d'infos ?

www.stocorp.com

www.lotusleafcoatings.com

www.youtube.com/watch?v=ql9ly2Dq4hE

www.youtube.com/channel/HCjFK-VVtyhBQ



Fleur de lotus



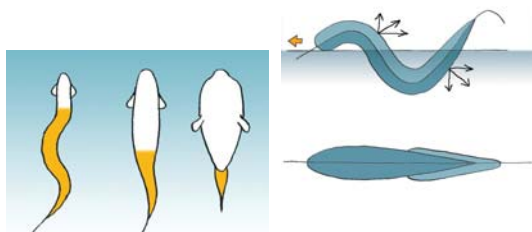
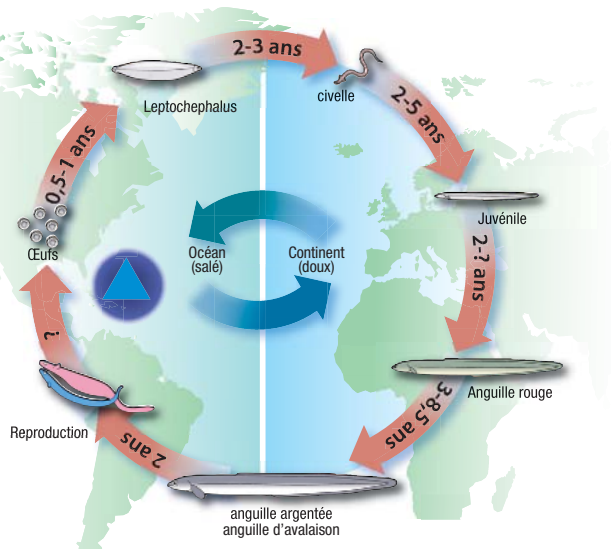
décomposées en CO_2 à l'aide de dioxyde de titane. De cette manière, la substance contribue à un environnement plus sain. Mais dans la pratique (comme toujours) ce n'est pas aussi simple.

Il existe trois sortes de TiO_2 . Elles se distinguent par la manière avec laquelle les atomes sont classés les uns autour des autres dans un réseau cristallin : il existe le rutile, l'anatase et le brookite. C'est essentiellement dans la forme d'anatase que le dioxyde de titane révèle ses propriétés catalytiques. Pour ce faire, la matière doit toutefois être activée par une dose de lumière UV. Une exposition aux rayons UV transforme le matériau en un puissant oxydant. Si puissant qu'il peut décomposer les molécules d'eau en radicaux hydroxyles ($\text{OH}\bullet$). Ces radicaux sont même aussi des particules particulièrement actives, en mesure d'oxyder rapidement et efficacement d'autres substances. Par conséquent, le dioxyde de titane est ajouté dans les peintures, les ciments, les fenêtres, les carreaux ou d'autres produits pour les stériliser, les désodoriser et pour veiller à ce qu'aucun micro-organisme ne commence à proliférer dessus.

Le grand défi consiste à obtenir la bonne forme cristalline de TiO_2 . Pour ce faire, les scientifiques vont chercher de l'aide au sein d'un groupe d'algues unicellulaire : les algues siliceuses ou diatomées. Celles-ci disposent d'une paroi cellulaire qui est composée de dioxyde de silice (SiO_2). Qu'en est-il aujourd'hui ? Attendu que les ions de silicium et de titane sont tous deux quadrivalents positifs (Ti^{4+}), l'algue considère les ions de titane comme s'il s'agissait d'ions de silicium. Elle assimile donc le titane aussi bien et utilise ces ions pour en constituer sa paroi cellulaire. L'algue nous aide ainsi à parvenir aux bons cristaux. En apprenant davantage sur le ménage en silicium des diatomées, les scientifiques veulent également parvenir à terme à le faire 'in vitro', donc sans algues dans les parages.

Au plus profond de la mer

Un des endroits où nous, les humains, ne nous sentons absolument pas chez nous, est la mer. Naturellement, nous aimons les bains de pieds, le surf et les longues promenades sur le sable au coucher du soleil.



Cycle de vie de l'anguille européenne *Anguilla anguilla*

Certains font même leur métier d'appareiller sur les sept océans avec des pétroliers, des bananiers ou des bateaux de croisière. Mais DANS la mer à proprement parler, nous ne survivons pas longtemps. Si nous voulons le faire, il nous faut de préférence aller demander conseil à ses habitants. Ils ont beaucoup de choses à nous apprendre...

Prenez par exemple la façon dont les poissons se déplacent. La plus ancienne façon est peut-être l'anguilliforme : nager comme une anguille. Dans ce cas, le



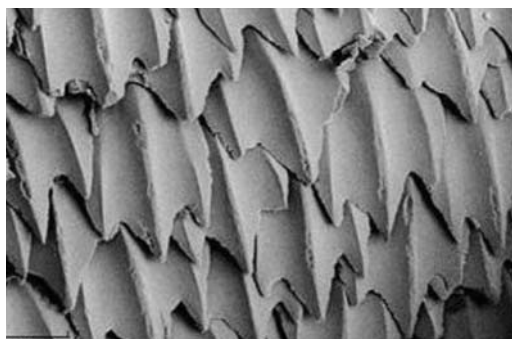
Lamproie (*Petromyzon marinus*) (Jeremy Monroe, NAIAD.org)



Photo Oldak Quill, Wikipedia

corps de l'animal ondule de la tête à la queue en forme de va-et-vient, où l'amplitude du déferlement augmente vers l'arrière. Les nageoires servent ici de surfaces de stabilisation pour le corps. Le mouvement des ondulations du corps exerce alors une force oblique à l'arrière sur l'eau environnante. Les composants latéraux de ces forces se compensent et les forces tournées vers l'arrière propulsent le poisson vers l'avant (voir la figure). Le fait que cette façon de se mouvoir est particulièrement efficace en termes d'énergie peut

être déduit des 6000 kilomètres que parcourt l'anguille chaque année pour aller frayer dans la mer des Sargasses. Les larves du poisson reviennent ensuite en Europe poussées par le Gulf Stream. Pour ce voyage, elles ne consacrent en outre que 120 grammes de tissu graisseux (40% de leur stock). D'autres poissons primitifs nagent également de la même façon : le poisson-flûte ou lamproie, et différentes sortes de requins, comme la roussette.



Peau de requin

Les requins ont encore beaucoup à nous apprendre. La structure spécifique des écailles d'une peau de requin (avec un sillon dans le sens de la longueur) veille à ce que l'eau ruisselle efficacement par-dessus. En effet, lorsque l'eau ruisselle sur toute une surface plane, il en résulte de grandes différences entre la vitesse du courant le long de la surface et la vitesse à une petite distance de celle-ci. Il en résulte des 'tourbillons' (eddies), des zones de turbulences qui ralentissent finalement l'objet. Les écailles de la peau de requin veillent à ce que ces tourbillons n'apparaissent pas, ce qui rend le requin plus rapide.

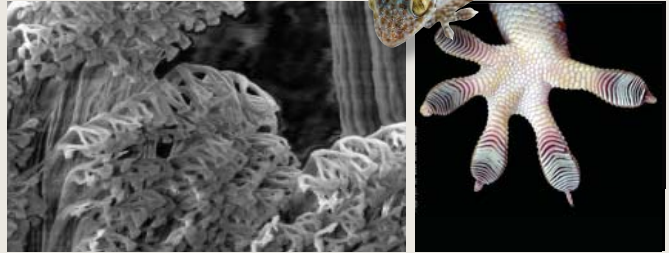
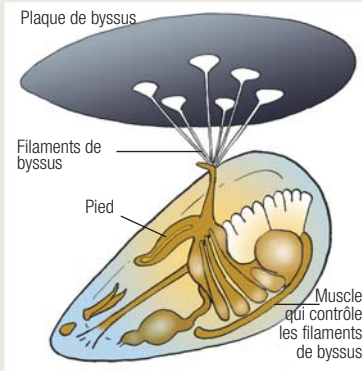
Entre-temps, des peintures qui portent en elles ces petites structures ont été développées, par exemple au sein de la firme anversoise Hydrex. On estime que le frottement sur les coques des navires peut être réduit de 5 % par cette technologie... Cela signifie une économie de 2000 tonnes de carburant fossile par année et par navire-porte-conteneurs ! L'utilisation d'une peinture de ce type dans l'aviation occasionnerait une économie annuelle de kérosène de 4,48 millions.



Queue de baleine. Photo Roland Valcke

La queue des requins nous aide également à avancer. Contrairement aux poissons 'habituels' (les poissons osseux), les requins n'ont pas de vessie





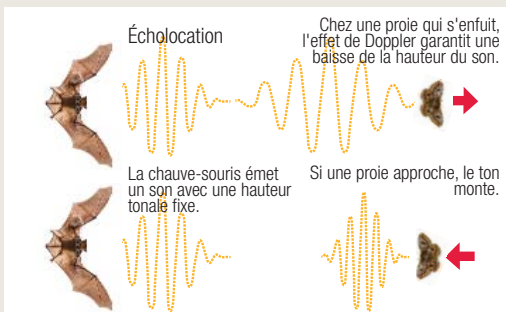
Une étude portant sur les protéines qui permettent aux filaments de byssus des moules de s'agripper aux surfaces des rochers a conduit au développement de nouveaux types de colle. De même, la structure de la plante du pied du gecko (qui peut rester suspendu à l'envers à une plaque de verre) est une source d'inspiration pour de nouvelles colles.



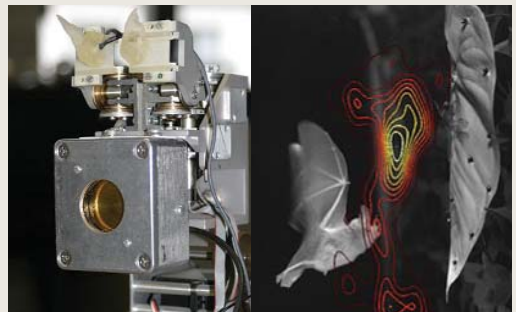
Les crochets de la bardane ont inspiré le Suisse Georges de Mestral à découvrir l'autoagrippant ou bande velcro.



La protéine résiline est présente chez différents insectes. Il s'agit de la protéine la plus élastique qu'on connaisse. Une variante fabriquée artificiellement peut contribuer à de meilleures chaussures, de meilleurs implants médicaux et même des applications en micro-électronique.



Les chauves-souris utilisent une forme de sonar pour trouver leur chemin dans l'obscurité et pour attraper leurs proies. Les animaux envoient de courtes pulsations sonores par leur nez et leur bouche, avec une puissance qui peut aller jusqu'à 120 décibels. La fréquence de ce son se situe entre 25.000 et 120.000 Hertz, trop élevée pour nos oreilles humaines. En utilisant une fréquence aussi élevée, elles peuvent percevoir facilement de petits objets. En outre, elles peuvent évaluer la direction d'un objet. Si une proie (par ex. une teigne, comme sur la figure) s'éloigne de la chauve-souris, le son d'écho aura une fréquence plus basse que si la teigne se dirigeait vers la chauve-souris. C'est ce que nous appelons l'effet Doppler. La différence en fréquence entre l'écho émis et reçu indique la vitesse avec laquelle la teigne se déplace par rapport à la chauve-souris.



La chauve-souris robotisée de l'équipe du Prof. Peremans (Université d'Anvers) imite la façon dont la chauve-souris envoie ses signaux. Pour ce faire, un modèle détaillé a été construit qui imite l'anatomie de la chauve-souris. De cette manière, les scientifiques espèrent contribuer à la façon dont les robots peuvent trouver leur chemin sans se heurter partout.

natatoire (une poche remplie d'air qui aide les poissons à continuer de flotter). Ils doivent donc veiller eux-mêmes à disposer d'une force ascendante suffisante (ascenseur) pour ne pas couler vers le fond de la mer. Cet ascenseur est manifestement poussé par la nageoire caudale typique des requins et des raies (poissons cartilagineux), qui sont bâtis de manière asymétrique, avec une plus grande surface de nageoire sur le dessus que sur le dessous. Nous trouvons une alternative chez les baleines. Ces gros mammifères doivent pouvoir pousser leur masse immense (20 à 25 tonnes) efficacement dans l'eau. Pour ce faire, elles disposent du relief sur le bord de leurs nageoires. Les inégalités (tubercules) qui s'y trouvent permettent aux animaux de chasser leurs proies. Un design similaire améliore l'efficacité des éoliennes de pas moins de 20% !



Beaucoup de plumes d'oiseau doivent leur couleur à la manière avec laquelle la structure de la plume reçoit la lumière incidente et la réfracte. L'entreprise japonaise Teijin Fibers Limited a vu en cela une alternative respectueuse de l'environnement aux pigments chimiques (souvent même à base de métaux lourds) que sont aujourd'hui utilisés partout dans l'industrie textile.



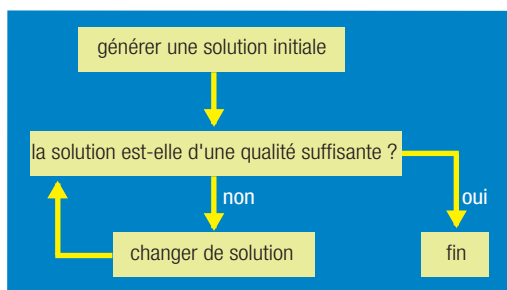
Une meilleure compréhension de la kératine dans les formes de bec de différentes espèces de pinsons aide à créer des matériaux plus solides - tel qu'il ressort d'une étude de Joris Soons et ses collègues du département de physique à l'Université d'Anvers.

Comment la nature peut-elle nous apprendre à compter

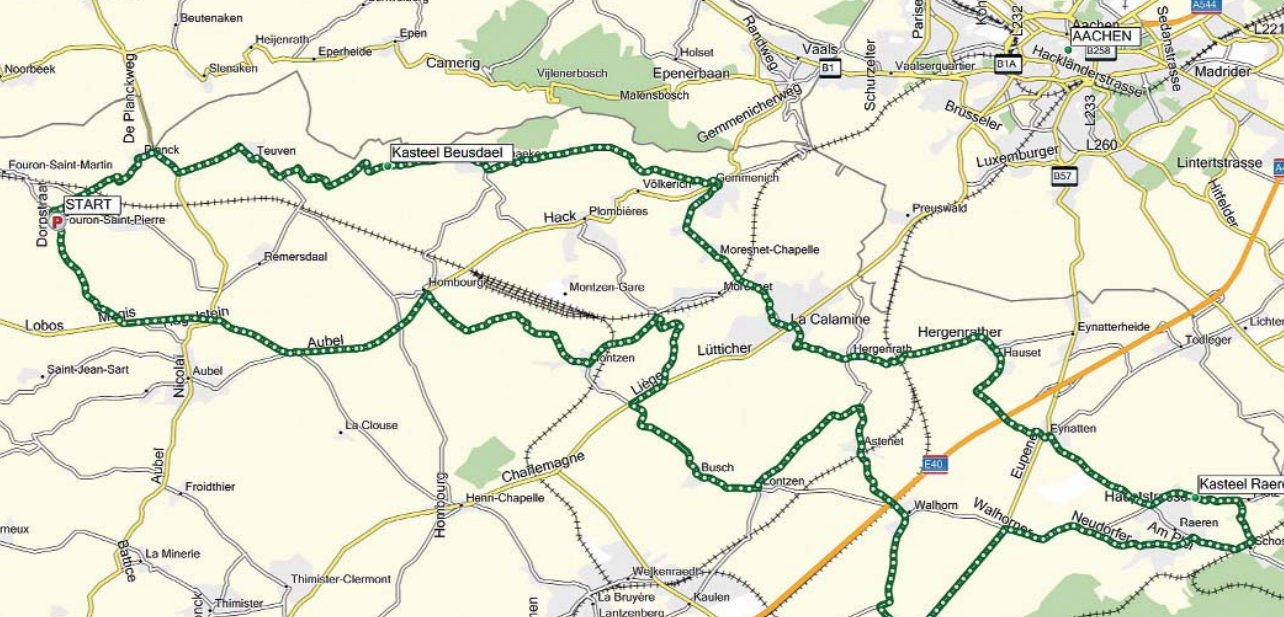
Les ordinateurs jouent un rôle incontestable dans la recherche biologique actuelle, plus personne n'en doute. Mais saviez-vous que les processus biologiques peuvent également constituer une source d'inspiration pour les informaticiens ?

Les ordinateurs sont toujours plus puissants. Cependant, il existe encore des problèmes que nous ne pouvons résoudre même avec les ordinateurs les plus puissants. Un exemple connu de ce type de problème est le problème du voyageur de commerce ('travelling salesman problem'). Prenons un voyageur de commerce (ou un rappeur en tournée si vous préférez), qui doit visiter un certain nombre de villes dans un pays. Il ne doit passer dans chaque ville qu'une seule fois, ni plus ni moins. En outre, son itinéraire doit être aussi court que possible, en tenant compte de la situation des villes et des distances qui les séparent. Un problème simple pensez-vous ? C'est ce que calcule chaque jour votre GPS ? C'est exact, lorsqu'il s'agit de quelques villes seulement.

Mais ce n'est pas aussi simple : chaque ville que vous ajoutez multiplie le nombre d'itinéraires possibles. En fait, le nombre d'itinéraires théoriquement possibles augmente de manière exponentielle avec le nombre de villes qui doivent être visitées. La durée de l'algorithme de calcul le plus simple, qui consiste à calculer une à une les distances de tous les itinéraires possi-



Un algorithme se compose d'une série de tâches qu'un programme informatique doit parcourir. Cette figure représente un exemple d'algorithme pour trouver par une approche heuristique une solution idéale (optimale) à des problèmes tels que celui du voyageur de commerce.



Itinéraire cyclotouriste GPS (GPS biketracks.be)

bles et à les comparer entre elles, augmente donc aussi de façon exponentielle avec le nombre de villes. Pour à peine cent villes, le nombre de chemins théoriquement possibles est déjà de plus de dix à la cent cinquante-huitième puissance (10^{158}). Un chiffre littéralement astronomique si vous pensez que notre univers compte approximativement dix exposant septante-huit (10^{78}) atomes et que vous devez en quelque sorte remplacer chaque atome de notre univers par un nouvel univers si vous voulez représenter tous les itinéraires possibles par un seul atome. Même le plus gros des superordinateurs que nous pouvons nous imaginer n'est pas en mesure de stocker toutes les solutions possibles ou de les tester. Or, une centaine de villes, ce n'est pas un chiffre tellement élevé que ça en devient absurde.

Heureusement, les informaticiens ont trouvé aujourd'hui des algorithmes plus intelligents. Certains de ces algorithmes sont tellement ingénieux qu'ils sont regroupés sous la dénomination 'intelligence artificielle'. L'intelligence artificielle est généralement définie comme l'art de créer des machines intelligentes. Dans ce domaine, le problème du voyageur de commerce est pratiquement le défi le plus connu. Si ces algorithmes n'existaient pas, il ne serait pas question par exemple du planificateur d'itinéraire électronique que nous trouvons tellement naturel aujourd'hui.

Le problème du voyageur de commerce est un problème de recherche typique. Il existe un nombre extrêmement important de solutions. Autrement dit, nous pouvons affirmer que l'espace de solutions (l'ensemble de toutes les solutions) est très grand. Ce dont nous avons besoin est une technique permettant de rechercher la meilleure solution parmi cet espace de solutions de la manière la plus efficace possible. En gros, il est possible d'aborder ce genre de problème de deux manières. La première manière est 'exhaustive' : une puissance suffisante permet de tester toutes les solutions. Nous avons déjà vu dans le paragraphe précédent que cette approche ne constitue pas un bon plan pour notre voyageur de commerce.

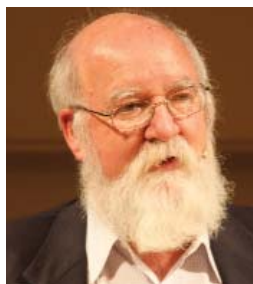
L'alternative est l'approche 'heuristique'. Dans ce cas, nous essayons d'exclure au préalable de manière intelligente des solutions invraisemblables, de manière à ne devoir explorer que le segment le plus vraisemblable de l'espace de recherche. Très souvent, nous partons dans le cadre de ce genre d'algorithmes d'un quasi-pari, une solution aléatoire (généralement mauvaise) que nous essayons d'améliorer de façon incrémentielle (autrement dit, étape par étape) jusqu'à ce qu'elle ne puisse plus être améliorée. Comment pouvons-nous de manière intelligente résoudre ce problème complexe et d'autres problèmes comparables ? La biologie offre une réponse surprenante à cette question.

“Le gène est de loin le programme le plus sophistiqué qui existe”

Bill Gates, Business Week, 1994

L'évolution biologique résout des questions informatiques

Les organismes vivants doivent continuellement s'adapter à un environnement changeant. Les propriétés qui leur donnent la chance d'anticiper sur leur milieu de vie sont codées dans le génome, dans le matériel d'ADN (voir aussi MeNS 50, portant sur la biologie systémique). Bien que ce génome soit transmis de génération en génération, il est en proie à de subtils (et parfois moins subtils) changements. Le matériel génétique peut subir des mutations, par exemple parce qu'une lettre dans le code ADN a été remplacée par accident par une autre lettre. Le matériel d'un organisme père et un organisme mère est mélangé de façon unique et imprévisible pour conduire à nouveau à un individu unique. La variation subtile entre les organismes qui en résulte constitue conjointement avec la sélection naturelle la base d'une évolution biologique. Les organismes qui sont mieux adaptés à leur environnement que d'autres ont notamment une plus grande chance de se reproduire. Les propriétés avantageuses se répandront donc aussi plus rapidement au sein de la population que les propriétés qui affaiblissent l'organisme. De cette manière, l'évolution offre encore et toujours une réponse à un milieu en changement constant.



Daniel Dennett



*L'observation des chimpanzés peut nous apprendre beaucoup sur les possibilités médicinales d'espèces de plantes inconnues. Les chimpanzés dans le Parc national de Gombe en Tanzanie mâchonnent souvent des feuilles d'*Aspilia*. Certaines de ces plantes contiennent un puissant antibiotique (thiarubine A). D'autres substances ressemblent à des dopants, comme la caféine pour les humains. Et la pulpe amère des tiges de l'arbuste *Vernonia amygdalina* les aide à se débarrasser des parasites et des crampes d'estomac. Ici encore donc nous pouvons apprendre de la nature.*

Dans son livre 'Darwin's dangerous idea' (1991) (Darwin est-il dangereux ?), l'écrivain Daniel Dennett indique que les idées de Darwin peuvent aussi avoir un impact bien au-delà de la biologie. Il décrit comment votre évolution elle-même peut être examinée comme un processus 'algorithmique'. Un processus relativement simple qui peut toutefois conduire à des structures très avancées. Une sélection naturelle peut être considérée comme un algorithme écervelé, mais efficace pour se déplacer dans l'espace des solutions. Par son livre, Dennett explique le processus évolutionnaire du contexte biologique classique.

Il est ainsi également possible de parler d'évolution culturelle. Quiconque conçoit un nouveau meuble opte pour une solution dans un espace de conceptions incommensurable, mais se laissera peut-être inspirer par des conceptions antérieures et des tendances. Il les intégrera dans sa conception (cross-over), mais innovera aussi (mutation). Les conceptions qui rencontreront le plus de succès auront probablement une plus forte influence sur les conceptions futures. En d'autres termes, l'évolution est un processus universel et omniprésent qui apporte une réponse énergique aux problèmes de recherche, bien au-delà de la biologie.

Algorithmes génétiques

Un des plus beaux exemples où les principes de l'évolution peuvent être appliqués dans un tout autre domaine sont les algorithmes génétiques. Il s'agit de techniques informatiques qui utilisent les principes de la génétique et de l'évolution pour résoudre des



	Dans la génétique...	En informatique
Population	Groupe d'individus de la même espèce	L'ensemble des solutions
Individu	Organisme	Solution éventuelle à un problème déterminé.
Chromosome	Séquence d'ADN sur laquelle se trouvent différents gènes. <i>Pour les bactéries, il n'y en a qu'un, chez des organismes supérieurs, il y a plusieurs chromosomes. Ensemble ils constituent l'empreinte génétique d'un individu complet.</i>	Élément dans un espace de solutions pour un problème déterminé.
Gène	Fragment d'ADN qui donne lieu à une protéine bien déterminée ; une propriété héréditaire. <i>Partie d'un chromosome</i>	Une des caractéristiques / propriétés d'une solution.
Allèle	Certaine forme d'un gène <i>Par ex. pour un gène qui détermine la "couleur des yeux", il existe un allèle pour "brun" et un pour "bleu".</i>	Contenu spécifique d'une des caractéristiques d'une solution éventuelle.
Fitness	Mesure selon laquelle l'individu est adapté à l'environnement ; ou encore : mesure selon laquelle un individu peut engendrer des descendants qui vont faire perdurer ses propres gènes dans les générations futures. <i>Plus cette aptitude (fitness) est élevée, meilleures sont les chances d'évolution de cet individu et ses propriétés (gènes)</i>	Mesure selon laquelle la solution s'adapte au problème spécifique. Plus l'adéquation est grande, meilleure est la solution.
Sélection	Les individus mal adaptés (dont l'aptitude (fitness) est faible) disparaissent : ils meurent plus vite que les autres, et ont moins de chances d'engendrer des descendants. Par conséquent, leurs gènes disparaissent également.	Les mauvaises solutions (dont l'adéquation est faible) disparaissent de l'ensemble des solutions.
Mutation	Changement structurel au niveau de l'ADN d'un gène déterminé	Dans une solution éventuelle, les propriétés ont été légèrement modifiées.
Cross-over	Pendant la méiose (production de cellules reproductrices), des morceaux de chromosome peuvent se détacher et rejoindre d'autres chromosomes.	Des fragments d'informations codées sont échangés entre des solutions éventuelles pour produire une nouvelle génération.

problèmes de recherche complexes, comme le problème du voyageur de commerce.

Les informaticiens utilisent à ce niveau une terminologie issue de la génétique avec laquelle les biologistes sont familiarisés. Un 'individu' et un 'chromosome' sont tous deux une solution éventuelle au problème (un itinéraire déterminé, dans le problème du voyageur de commerce). Un 'gène' est une propriété de cette solution éventuelle, et un 'allèle' correspond au contenu de cette propriété pour un individu bien déterminé. Une 'population' correspond à

l'ensemble complet des solutions éventuelles. L'aptitude ('fitness') indique dans quelle mesure une solution éventuelle est bonne, suivant des critères prédéfinis. Et nous utilisons un ensemble d'opérateurs génétiques' comme sélection, mutation et cross-over, pour faire 'évoluer' l'ensemble initial de solutions éventuelles.

Avant que l'algorithme génétique lui-même ne soit mis en œuvre, on réfléchit à la façon dont une solution éventuelle peut être présentée. Dans le cas du problème du voyageur de commerce, on pourrait par



exemple déterminer qu'un itinéraire éventuel (un individu) se présente comme une suite linéaire de symboles qui représentent chacun une ville. Ensuite, il faut définir comment l'adéquation (fitness) de ces individus peut être calculée. Dans notre exemple, c'est notamment possible en additionnant les unes aux autres les distances entre les villes contiguës (dans ce cas, on applique le principe que plus le voyage total est long, plus l'adéquation est faible).

L'algorithme lui-même est modelé sur la théorie de l'évolution de Darwin (voir MeNS 40). Il se présente typiquement comme suit :

1. Générer une population initiale d'individus ;
2. Évaluer l'adéquation (fitness) de chaque individu dans la population ;
3. Sélectionner dans la population les individus les plus 'adéquats' et supprimer le reste ;
4. Répéter les étapes suivantes aussi longtemps que l'adéquation peut être améliorée, ou jusqu'à ce qu'un niveau d'adéquation souhaité soit atteint :
 - 4.1. Reproduction : créez une nouvelle génération via un cross-over entre les individus ;
 - 4.2. Mutations : causer des changements au sein des individus ;
 - 4.3. Évaluer l'adéquation (fitness) de chaque individu dans la population et supprimer le reste ;
 - 4.4. Sélectionner dans la population les individus les plus 'adéquats' et supprimer le reste ;
5. Donner la solution la plus adaptée

Une population d'individus est tout d'abord générée au hasard. Dans l'exemple, il s'agit d'un ensemble de centaines ou milliers d'itinéraires, qui chacun se



composent d'une suite de symboles. Si vous le souhaitez, vous pouvez filtrer au préalable cet ensemble suivant certaines propriétés (pour le voyageur de commerce, nous ne voulons par exemple autoriser que les itinéraires qui ne visitent chaque ville qu'une seule fois). Ensuite, nous calculons pour chaque solution éventuelle l'adéquation (fitness). Dans la population, nous sélectionnons les individus qui présentent une adéquation supérieure, tandis que nous écartons les moins bonnes solutions. Ensuite, une nouvelle variété est introduite dans la population en utilisant des opérateurs génétiques.

Le cross-over (mélissage) implique d'intervertir des éléments d'informations codées réciproquement entre des individus accouplés pour produire une nouvelle génération d'individus. Une mutation signifie qu'au sein d'un individu, des petites variations aléatoires sont introduites dans les informations codées. À nouveau, il peut être nécessaire d'appliquer un mécanisme de contrôle qui exclue les solutions impossibles (comme un itinéraire pour le voyageur de commerce qui passe une ville). Le processus de calcul de l'adéquation, la sélection et l'introduction



La forme du train à grande vitesse japonais Shinkansen est tirée du bec aérodynamique du martin-pêcheur.



Une forme aérodynamique pour une voiture ? On ne le dirait pas à première vue. Pourtant des ingénieurs de chez Mercedes ont pu apprendre beaucoup des ostracionidés (comme l'Ostracion cubicus) sur la propulsion efficace en termes d'énergie. Photo J Petersen, Wikipedia



Des insectes sociaux comme les fourmis peuvent très efficacement trouver le chemin le plus court entre une source d'alimentation et le nid. Ensuite, elles utilisent massivement ce chemin, comme dans cette forêt vierge au Panama. Le fait de trouver ce chemin le plus court est un exemple typique d'intelligence en essaim.

d'une variation sont ensuite répétés. La combinaison d'une variation et une pression de sélection veille à ce que l'algorithme génère progressivement de meilleures solutions. Ce processus peut se poursuivre jusqu'à ce qu'une adéquation souhaitée soit atteinte ou jusqu'à ce que nous constatons que l'adéquation ne s'améliore plus.

Compter avec les fourmis et avec l'ADN

La nature a encore contribué de nombreuses autres façons au développement de nouvelles techniques de calcul. Dès lors, nous les désignons aussi conjointement par les termes 'natural computation'.

Un tout autre exemple est basé sur le monde des insectes, et en particulier le comportement des insectes sociaux, comme les fourmis. Si vous regardez bien, vous voyez qu'un nid de fourmis est à vrai dire un système intelligent complexe et adapté. Ainsi, les fourmis parviennent à trouver très rapidement et efficacement le plus court chemin entre une nouvelle source de nourriture découverte et leur nid, quels que soient les obstacles qu'elles rencontrent sur leur chemin. Ensuite, elles utilisent massivement cet itinéraire (figure). En fait, elles résolvent par là le problème du plus court chemin, une question complexe qui est proche du problème du voyageur de commerce.

Toutefois, les fourmis individuelles ne sont pas intelligentes : en tant qu'individu, elles se comportent suivant un ensemble limité de règles simples. Le

phénomène permettant qu'en dépit de leurs capacités individuelles limitées et sans la présence d'une coordination centrale, elles parviennent cependant à afficher un comportement collectif intelligent est décrit par les termes 'Swarm Intelligence' ou intelligence en essaim. Ce comportement est lui aussi une source d'inspiration pour un nouveau type de techniques de calcul. Le secret derrière l'intelligence du groupe de fourmis qui trouve le plus court chemin de la nourriture vers le nid réside dans la manière avec laquelle elles communiquent entre elles. Elles le font en utilisant des phéromones. Il s'agit de substances odorantes que chaque fourmi dépose sur son passage. Si des fourmis cherchent un chemin et rencontrent un phéromone de leurs compagnons de nid, il est vraisemblable qu'elles vont suivre ce chemin. Sur un chemin réussi, elles déposent ensuite également leur propre phéromone. De cette manière, toujours plus de fourmis à la recherche de chemins choisiront plus rapidement des chemins courts. Ce mécanisme fonctionne naturellement et résout efficacement le problème du chemin le plus court.

Nous pouvons parfaitement le simuler dans un ordinateur, par exemple pour calculer la plus courte distance entre un point A et un point B, ou pour rechercher via quels contacts dans un réseau social comme Facebook nous pouvons relier entre eux deux utilisateurs. L'intelligence en essaim connaît ainsi également un grand nombre d'applications en informatique et en robotique.

Nous pouvons encore aller un pas plus loin. Nous n'avons pas toujours besoin d'un ordinateur pour calculer en étant inspirés par la biologie. En 1994, le professeur californien en informatique et biologie moléculaire Leonard Adleman et ses collègues ont démontré qu'on peut encore résoudre une autre version du problème du voyageur de commerce (le problème du chemin hamiltonien) en utilisant les molécules d'ADN comme un tube à essai. En utilisant de l'ADN

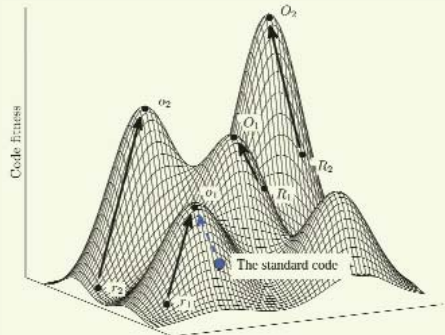
... one general law, leading to the advancement of all organic beings, namely, multiply, vary, let the strongest live and the weakest die."

C. Darwin, The Origin of Species, 1859

Avantages et inconvénients

Les algorithmes génétiques sont des exemples de l'approche précédemment appelée 'heuristique', par laquelle des problèmes d'optimisation complexe peuvent être efficacement résolus. Une propriété pratique de ces techniques est en outre qu'elles peuvent être bien réparties pour être simultanément calculées sur plusieurs ordinateurs. Cela signifie qu'elles conviennent pour être exécutées sur des groupes de super ordinateurs, où des questions d'optimisation particulièrement complexes peuvent être traitées (et pour lesquelles des semaines ou des mois de calculs sont parfois nécessaires). Elles sont surtout pratiques lorsqu'il s'agit de problèmes complexes, par exemple où le nombre de variables et/ou le nombre de solutions possibles sont extrêmement grands.

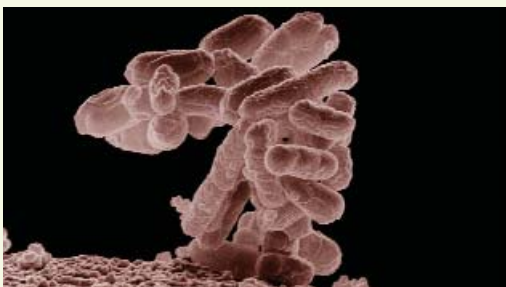
Les algorithmes génétiques, tout comme beaucoup d'autres techniques d'optimisation, s'accompagnent aussi de quelques inconvénients qu'on ne peut nier. Le premier inconvénient est qu'ils conduisent souvent à de bonnes solutions, mais qu'on ne peut être certain qu'il s'agisse cependant de la meilleure solution. On peut les comparer à la recherche du plus haut sommet dans une chaîne de montagnes comme les Alpes. Ces algorithmes sont très bons pour trouver de hauts sommets. On ne peut toutefois jamais être certain qu'il n'y a pas quelque part un sommet encore plus haut que l'on a manqué. Dans la pratique, ce problème ne semble bien souvent pas aussi sérieux. Nous sommes déjà contents lorsque nous trouvons une bonne solution, même si nous n'avons aucune garantie que nous ayons trouvé la meilleure solution. Un autre inconvénient de ces algorithmes est leur imprévisibilité. Si l'on



Un inconvénient important des techniques d'optimisation génétiques et autres est qu'elles trouvent effectivement de bonnes solutions, mais qu'on n'a aucune garantie que ces solutions soient aussi les meilleures. Si l'on reproduit l'adéquation comme une hauteur en fonction de deux variables, on reconnaît dans le 'paysage de l'adéquation' un seul optimum global et plusieurs optima locaux, tout comme une chaîne de montagnes a plusieurs sommets, dont un seul peut être le plus haut.

exécute deux fois l'expérience avec à chaque fois un autre ensemble aléatoire de solutions éventuelles ou avec des paramètres d'exécution modifiés (par exemple la vitesse de mutation), on n'a aucune garantie de parvenir à la même solution finale. Ce peut être gênant, car cela signifie que les expériences exécutées sans les bonnes mesures et une analyse statistique correcte ne sont pas toujours exactement reproductibles.

Il existe bien quelques trucs pour résoudre en partie ces inconvénients. On peut par exemple répéter plusieurs fois toute la routine avec une population de départ aléatoire différente, et ensuite regarder si les résultats finaux diffèrent encore l'un de l'autre. Les informaticiens et mathématiciens ont développé au fil des années une multitude de variantes pour aborder ces problèmes et d'autres. Aujourd'hui, nous disposons d'une large gamme de techniques d'optimisation (dont un groupe important est inspiré de la nature). De cette manière, nous pouvons imaginer une solution sur mesure pour chaque problème de calcul.



On retrouve une autre forme d'intelligence collective au niveau de la bactérie intestinale Escherichia coli. Ces cellules simples suivent une série de règles simples pour s'éloigner des substances chimiques (par ex. des substances toxiques), ou justement pour s'en approcher (par ex. des aliments). Des chercheurs chinois ont tiré des algorithmes de ces règles pour permettre au trafic de mieux s'écouler pendant les heures de pointe. Photo Eric Erbe, Wikipedia



Certains algorithmes génétiques et autres inspirés par la nature peuvent efficacement être exécutés par des superordinateurs, comme ce superordinateur CalcUA à l'Université d'Anvers. Photo Vincent Jauniaux

naturel, ils ont démontré en outre que le temps nécessaire pour résoudre ce problème n'augmentait plus de façon exponentielle, mais bien linéaire avec le nombre de villes. Cela signifie que calculer un itinéraire avec plus de villes ainsi brusquement ne constitue plus un problème. Vous avez uniquement besoin d'un labo de biologie moléculaire...

Des collègues d'Adleman ont aujourd'hui développé des variantes de la méthode pour résoudre d'autres problèmes pénibles avec des biomolécules, comme l'ADN, mais aussi l'ARN et des protéines. On ne connaît pas encore aujourd'hui d'applications pratiques de l'utilisation de biomolécules pour des problèmes de calculs, car on ne peut en effet pas encore actuellement insérer un laboratoire de biologie moléculaire dans la boîte à gants de sa voiture pour calculer son itinéraire. Pourtant, nous osons aujourd'hui déjà imaginer un temps où nous pourrions développer des médicaments intelligents capables de prendre eux-mêmes dans notre corps les décisions nécessaires, par exemple en fonction de l'évolution d'une maladie.

De la génétique à l'informatique à domicile ?

Les domaines d'application des méthodes de calcul naturelles comme les algorithmes génétiques et leurs variantes sont toutefois très divers dans le monde des ordinateurs. Pensez notamment à l'analyse des réseaux sociaux à des fins de marketing, au développement de filtres à spams plus intelligents, aux jeux informatiques intelligents, à l'établissement d'horaires de cours... Dans les laboratoires d'informatique de l'Université d'Anvers, les informaticiens les utilisent également pour approfondir des questions de biologie moléculaire dans la branche de la 'bio-informatique'. Ils confient ainsi à des algorithmes génétiques le soin d'évaluer sur la base de la structure et de la forme des protéines comment ces protéines vont se rattacher les unes aux autres. Ils peuvent alors imiter la façon dont les protéines interviennent notamment dans l'apparition de maladies, comme le cancer.



Certains algorithmes génétiques et d'autres algorithmes naturels sont également utilisés dans des jeux informatiques pour permettre à votre adversaire virtuel de présenter un comportement intelligent. Images de Age of Empires III, Microsoft

Il est très fascinant de voir que des techniques qui sont inspirées par la biologie trouvent à nouveau leur rôle dans la recherche biologique. Ce n'est pas tout à fait un hasard. Finalement, ces techniques sont déjà utilisées depuis des millions d'années pour optimiser des systèmes biologiques. C'est nous, les hommes, qui ne les avons redécouverts qu'il y a peu et les avons ramenés vers la biologie d'où on pouvait les emprunter. Et la boucle est ainsi bouclée !

Pour terminer...

Le monde et l'univers sont des endroits exceptionnellement beaux. Plus nous les comprenons, et plus ils paraissent beaux. C'est une expérience incroyablement stimulante que d'être né dans ce monde, d'être né dans cet univers, et de regarder autour de nous et de réaliser qu'on a la chance avant de mourir d'apprendre une immense quantité de choses sur ce monde, cet univers et la vie, et de comprendre pourquoi nous sommes ici. Nous avons des possibilités pour comprendre plus, beaucoup plus que nos ancêtres. C'est tellement captivant que ce serait une honte que de laisser passer cette chance et de finir sa vie sans comprendre tout ce qu'il y a à comprendre.



Richard Dawkins



Créateur de chances

La Loterie Nationale, c'est
chaque année, 4 millions d'euros pour
le développement durable.
Grâce à vous.



Loterie Nationale

www.loterie-nationale.be

PRIX DE LA JEUNESSE 2013 BAEKELAND

A gagner:
2500 euros
offerts par la
Loterie Nationale



L'habitat de demain

Depuis 2009, Bio-MENS organise chaque année le Prix de la Jeunesse Baekeland, un concours pour les élèves du troisième degré de l'enseignement secondaire (ESG, EST, ESP, ESA). Ce concours a déjà été articulé autour de thèmes tels que l'innovation, la biodiversité marine et la surpopulation.

'L'Habitat de demain' est le thème du Prix de la Jeunesse Baekeland 2013.

Développez une argumentation critique en groupes de 5 élèves minimum et/ou élaborer un travail créatif autour du thème. Parmi tous les envois, un jury composé de personnes issues de l'enseignement, des pouvoirs publics et des entreprises désignera six finalistes autorisés à présenter leur travail au jury et au grand public. En outre, pendant la finale, vous prendrez part à un débat thématique vous permettant de faire preuve d'éloquence.

Envie de rester informé au sujet concours? Envoyez sans plus attendre votre nom, le nom de votre école et votre adresse à kaat@biomens.eu. Nous vous tiendrons informé!

De plus amples informations sur le prix seront bientôt disponibles sur notre site www.biomens.eu.



MENS 58 Dossier à venir : L'audition

