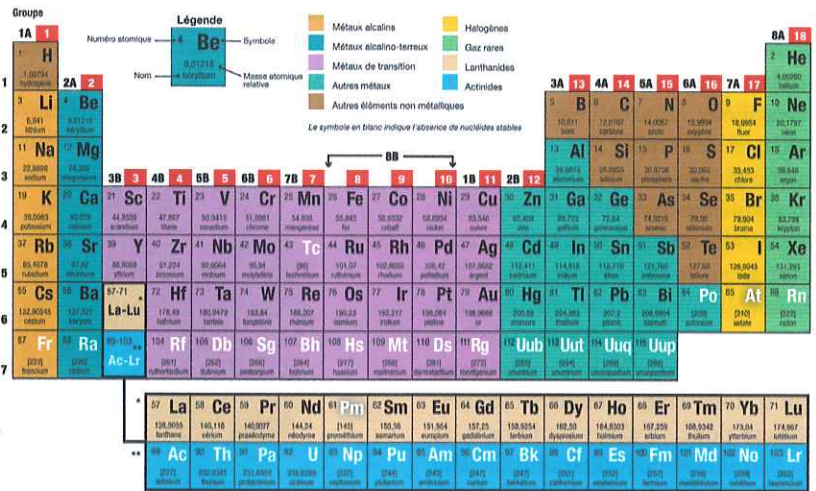


Du Big Bang aux nanomatériaux

Michel Jeandin,

Directeur de recherches à l'École des Mines de Paris

Première partie d'une conférence donnée au Centre des Conférences Pierre Mendès-France à Bercy, en présence du président national de l'AMOPA, M. Michel Berthet, le 30 mars 2011. La deuxième partie, « Des nanomatériaux au Big Crunch via la biomimétique » sera présentée dans le n° 194 de la Revue.



UNE récente conférence de l'AMOPA portait sur Jules Verne. La modeste ambition de cet article est d'essayer de vous montrer que les matériaux peuvent, tout comme Jules Verne, et toutes proportions gardées, faire rêver. Ce texte en présente un panorama, un « panoramatériaux » donc, si son auteur peut se permettre ce mot-valise dans une revue au lectorat constitué de grands défenseurs de la langue française.

Les matériaux sont extraordinaires et font rêver pour trois raisons : *primo*, parce qu'ils font réagir nos sens, *secundo*, parce qu'ils vivifient notre pensée, *tertio*, parce qu'ils sont en résonance avec la nature, ce qui est, de nos jours, très bien porté. Après une introduction générale sur « Matériaux et vie », l'article commencera donc par traiter des matériaux et de nos sens : de l'homme donc. Il s'intéressera, ensuite, à la pensée en relation avec les matériaux, dans une partie un peu pompeusement intitulée « Humanité et matériaux ». Le concept, encore un grand mot, de matériosophie, point de rencontre entre science des matériaux et philosophie, y sera présenté. La part belle y est réservée à la pensée comme il se doit : rôle de la pensée que l'on retrouve dans l'histoire de l'humanité à travers les âges. L'article insistera sur l'époque moderne en se concentrant sur les nanomatériaux

qui vont habiter de plus en plus notre quotidien. « *Le quotidien, oui mais à condition que ce ne soit pas tous les jours* » disent certains. L'explication de cette réaction sera donnée : l'avenir étant, opinion de plus en plus partagée, réservé aux matériaux naturels, dans le sens de « *inspirés par la nature* ». Pour y aider, une discipline se développe depuis une décennie environ : la biomimétique. Elle existe depuis toujours, d'ailleurs, mais l'homme, tel M. Jourdain la pratique sans le savoir. Un peu de prospective, au-delà du futur même, fera office de conclusion.

MATÉRIAU ET VIE

On peut comprendre ce titre « *Matériau et vie* » comme « *le matériau et la vie* », ou bien comme « *le matériau est la vie* » ou encore comme « *le matériau est en vie* », ou enfin, par homophonie, comme « *le matériau est envie* ». L'un des objectifs de cet article est, d'ailleurs, que vous ayez envie d'en savoir plus sur les matériaux.

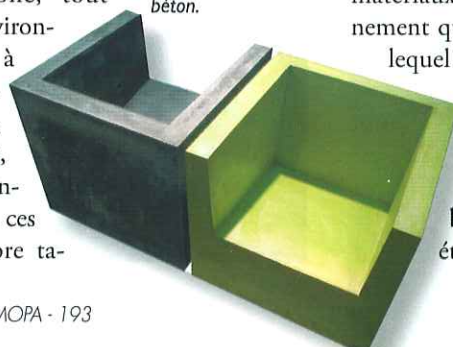
Matériau et vie donc, tout d'abord. L'homme est environné de matériaux, formés à partir d'éléments présents sur terre ou, plutôt, dans la terre. On a classé, plus précisément, M. Mendeleïev a classé, en 1869, ces éléments dans un célèbre ta-

▲ Fig. 1 : tableau périodique des éléments, table de Mendeleïev (Dimitri Ivanovitch) savant russe 1834 - 1907.

bleau périodique qui a fait sa gloire (figure 1). En se combinant entre eux, ces éléments peuvent conduire à des matériaux de différentes natures. Ainsi, si tant est que cela soit possible, l'américium -Am-, l'oxygène -O- et le protactinium -Pa- (figure 1) conduiraient à l'AmOPa, un matériau précieux sans nul doute. C'est grâce à leur combinaison en alliages à hautes propriétés que l'on peut construire, par exemple, de beaux ouvrages d'art comme l'élégante passerelle Simone-Beauvoir, à portée de fusil du centre de conférence du Ministère des Finances, ou comme, plus évident encore, la Tour Eiffel. On devrait, d'ailleurs, plutôt l'appeler la tour en fer : l'idée de génie d'Eiffel ayant été de la construire en fer (dit « *puddlé* ») plutôt qu'en acier pour qu'elle présente une certaine souplesse et fasse face, cela dit, pour simplifier et allitérer, aux assauts du vent parisien. Aujourd'hui, une ingénierie évoluée des matériaux s'étend à notre environnement quotidien : ainsi, le siège sur lequel on est assis, par exemple.

Sans être une merveille métallurgique comme la Tour Eiffel, beaucoup pourrait être écrit probablement. Cet article ne s'y étendra pas, cependant (c'est

▼ Fig. 2 : Fauteuils en béton.



été une banquette!). Plus proche de la prouesse, si l'on reste dans le siège (!?) est la réalisation de fauteuils en béton: dernier cri de l'ameublement chic mais terreur des déménageurs (figure 2).

Le matériau est vie: Einstein ne disait rien d'autre que cela dans sa fameuse équation, $E=mc^2$. Cette relation traduit, simplement, l'équivalence entre l'énergie totale enfermée dans un corps, E, et sa masse, m: avec comme rapport de proportion la vitesse de la lumière, trait d'union miraculeux, pour ne pas dire lumineux, entre l'espace et le temps dans la théorie de la relativité. L'une des conséquences majeures de l'équation d'Einstein, est, qu'à partir de lumière, peut se créer de la matière: résultat de la collision entre ce que l'on peut appeler « grains de lumière ». C'est ce qui s'est passé lors du Big Bang qui a donc créé la matière, les matériaux donc. Il s'agit de la base de la cosmologie contemporaine telle que l'a décrite le célèbre astrophysicien britannique Stephen Hawking, et les non moins célèbres -mais assurément moins sérieux- frères Bogdanov. Donc, le matériau est vie. Quelque étymologiste farfelu y verrait, d'ailleurs, confirmation, dans la présence de « mater » dans le mot matériau. Des charlatans vendeurs de paranormal pourraient emboîter le pas en tentant de prouver que le matériau est en vie, en vie dans le sens de vivant. Ainsi, Uri Geller tenta-t-il dans les années soixante-dix de prouver la vie des matériaux en montrant que le métal (sous la forme de cuillères notamment qui firent sa fortune) pouvait se tordre et se rompre sans être manipulé (figure 3). Le matériau est bien vivant dans le sens où il réagit, ce qui n'est pas dû à une cause paranormale mais parce qu'il est structuré et peut évoluer. Pour casser une cuillère en alliage d'aluminium, par exemple, il suffit de l'imprégner avec un petit bout de métal appelé gallium, du nom de son découvreur M. Lecoq -gallus en latin- qui a la particularité, pas M. Lecoq mais le métal, d'être liquide à une température voisine de la température ambiante. Le gallium liquide peut pénétrer dans le matériau, ici de l'aluminium, et le fragiliser. Pendant la guerre du Kippour, d'ailleurs, des crayons au gallium ont



▲ Fig. 3: Uri Geller

été utilisés pour fragiliser les ailes d'avions ennemis.

Le matériau est bien vivant, parce qu'il peut aussi s'éduquer et se transformer tout seul: se tordre ici, non sous l'effet, là non plus, d'une force paranormale à la Geller. L'éducation -car il s'agit bien du terme scientifique consacré- consiste à chauffer le matériau à une certaine température et à le refroidir à une autre température, de manière cyclique. À chacune de ces températures, il se trouve



dans un état microstructural avec une forme donnée. Pour certaines compositions de matériaux, l'effet de forme est rémanent et la transformation en fonction de la température parfaitement réversible. Ces compositions correspondent à ce que l'on appelle

les matériaux (alliages) à mémoire de forme (AMF) dont les applications industrielles, amorcées dans les années soixante-dix, sont nombreuses aujourd'hui. Parmi les plus récentes figures, la chemise qui raccourcit ses manches d'elle-même dès que la température extérieure est élevée (figure 4a). Le terme « forme » peut être pris alors dans son autre acception de « condition physique ». Pour rester en forme, on se retrouse les manches.

Dans la classe des alliages métalliques, les « nickel-titane » (NiTi) figurent parmi les plus répandus des AMF.

Le mécanisme de mémoire de forme s'applique aussi aux matériaux polymères, le silicone, en particu-

lier. L'effet « mémoire de forme » est dû à la nature chimique du silicone (liaisons... Si-O-Si-O...). Une société a fait, récemment, sa fortune en commercialisant des bracelets, appelés « BandZila » (figure 4b), qui font fureur auprès des adolescents. On peut l'étirer, en le mettant au poignet notamment. Une fois retiré, le bracelet reviendra à sa forme initiale.

Enfin, le matériau est envie. Jusqu'alors, on n'avait jamais entendu un enfant voulant travailler plus tard dans le domaine des matériaux; on rencontrait plutôt des vocations à devenir pompier, médecin, etc. Aujourd'hui, les matériaux sont beaucoup plus grand public. Y contribue le développement de manifestations de grande ampleur comme le congrès « Matériaux » de Nantes en octobre 2010 qui a rassemblé près de 2000 participants. Dans les écoles et collèges aussi, les élèves sont plus sensibles aux matériaux, grâce notamment à des actions comme la « Main à la pâte » de George Charpak. Leurs sens s'ouvrent aux matériaux, ce qui tombe bien car les matériaux touchent aux sens.

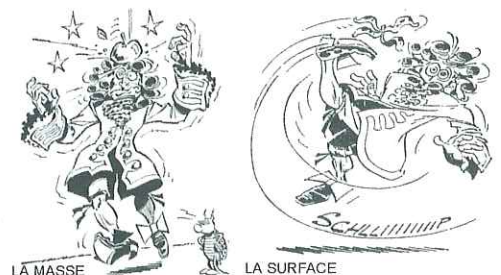
MATÉRIAUX ET SENS

Puisque les matériaux touchent aux sens, il est logique de commencer par

▲ Fig. 4: Exemples de matériaux à mémoire de forme: a) Textile autoraccourcissant, b) Bracelets polymères.

► Fig. 5: La masse et la surface selon Newton, d'après M. Gotlib, 1974.

▼ Fig. 6: « La femme au chapeau » de Picasso dans la Galerie tactile du musée Beaubourg.



le toucher. Ce sens doit être d'autant plus mis en avant que c'est la surface, maintenant, qui prime dans un matériau et non plus ses propriétés massives. Si Newton avait glissé sur une peau de banane au lieu de recevoir une pomme sur la tête, la science des matériaux, si ce n'est la face du monde, en aurait été changée (figure 5).

L'analyse sensorielle, discipline en plein essor actuellement, en aurait été développée beaucoup plus tôt. L'analyse sensorielle est l'ensemble des méthodes permettant de mesurer les perceptions sensorielles. Une belle application en est la possibilité offerte aux aveugles dans les musées, Beaubourg par exemple, d'admirer des





œuvres tactilement, la « *Femme au chapeau* » de Picasso par exemple (figure 6).

L'analyse sensorielle permet donc au toucher de mieux encore venir au secours de la vue donc. C'est particulièrement utile quand d'autres matériaux se développent pour l'empêcher (la vue): les métamatériaux. Ces matériaux sont à la base de l'un des développements les plus spectaculaires, toujours en cours d'ailleurs, de la science des matériaux. Grâce à eux, le mythe de l'homme invisible devient, enfin, réalité. De tout temps, il a été bien vu d'être invisible. Il en fut ainsi

du personnage Wellisien de Peter Brady interprété par Tim Turner (dont on cacha

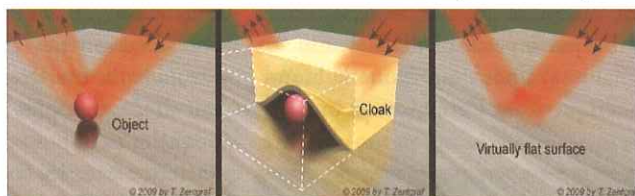
l'identité pendant longtemps, ce qui en fit un acteur vraiment invisible) dans la série télé des années soixante (figure 7a). Nos enfants citeraient, plus volontiers, Harry Potter (figure 7b) avec sa cape d'invisibilité qu'il suffit de revêtir pour être invisible; c'est époustoufflant, en particulier pour qui ne connaît pas les métamatériaux. À ce que l'on dit, cependant, il y aurait trucage: la vie est décevante parfois. Sans trucage, des chercheurs japonais ont reproduit, récemment, l'effet, sans, toutefois, rien d'extraordinaire puisqu'ils ne font appel qu'à un habile dispositif de rétroprojection, aux applications industrielles innovantes, dans le domaine de l'automobile en particulier.

Plus fort est l'emploi de métamatériaux. Un métamatériau, comme le fait la cape d'invisibilité, efface l'objet qu'il recouvre, en le rendant transparent à la lumière (figure 8).

Aujourd'hui, il ne le rend transparent que pour certaines longueurs d'onde, en d'autres termes pour certains types de lumière. Raisonnable-

ment, dans un futur pas trop éloigné, cela s'appliquera à tout le spectre lumineux: la lumière normale donc. Les premières preuves de ce miracle remontent à 2006, avec l'expérience pionnière menée à l'université Duke de Durham (USA). Dans cette expérience, un train d'ondes -de micro-ondes en l'occurrence-, que l'on pourrait appeler lumière pour simplifier, est visualisé. Quand on met sur le trajet des ondes un objet, leur progression en est arrêtée. En revanche, si cet objet est entouré d'un métamatériau, tel l'anneau de Gygès platonicien, les ondes ne sont pas perturbées par la traversée de l'objet.

Pour ce qui est de l'ouïe, on ne peut nier que les matériaux fassent du bruit: le bois par exemple. Une question turlupinante reste de savoir si, quand il fait du bruit, le bois joue ou s'il travaille. À l'inverse, pour supprimer le bruit, on peut utiliser des matériaux très poreux dits poro-



◀ Fig. 7: Évolution récente de l'invisibilité, a) Peter Brady (1958), b) Harry Potter (2001),

◀ Fig. 8: Principe de l'invisibilité par un métamatériau, d'après T. Zentgraf, 2009

matériaux, en plein développement actuellement. Ils sont constitués à 95 %, ou plus, de vide qui absorbe le bruit. Pour aller dans tous les sens, le silence résultant de l'emploi de poromatériaux peut, d'ailleurs, être rendu visible sous forme de lumière grâce à d'autres matériaux dits acoustosensibles qui transforment le son, ou le manque de son, en lumière. L'artiste Jakob Gautel en a exploité les fonctions dans sa sculpture intitulée « *Un ange passe* », un temps installée dans le quartier de la Bastille à Paris. Cette sculpture servait de « *détecteur d'ange* » comme le revendiquait l'artiste, en s'allumant dès que le silence (quand l'ange passe) s'établissait. L'oreille sait ainsi où elle a quelque chose à voir comme le dit joliment Philippe Sollers dans son dernier livre (« *Trésor d'Amour* », Gallimard, 2011, p. 16). Des « *détecteurs d'anges* » construits sur ce modèle se sont multipliés depuis. En milieu urbain où les anges ne sont pas légion, il est inutile de dire que l'installation consomme peu.

L'odorat comme les autres sens intéressent les matériaux. Les « nez » chez les parfumeurs en sont les premiers convaincus en élaborant des parfums métalliques et/ou boisés, par exemple. On commence à les synthétiser, d'ailleurs. À l'inverse, ici aussi, le matériau peut combattre la perception sensorielle. Dans le cas de l'odorat, cette fonction est assurée par les matériaux capteurs d'odeurs, grâce encore au rôle primordial de leur surface siège d'échanges chimiques inhibiteurs: ainsi sur le bord de voies à grande circulation où des murs anti-odeurs absorbent les gaz d'échappement comme sur l'une des bretelles du périphérique parisien à la Porte des Lilas. Pour le goût, on se contentera de dire que l'auteur espère que cet article en donnera au lecteur un peu pour les matériaux. Ces derniers en ont, indubitablement, comme un pays de gastronomes comme la France ne peut l'ignorer.

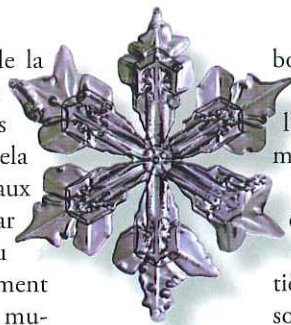
HUMANITÉ ET MATÉRIAUX

Au-delà des sens, les matériaux mobilisent la pensée de l'homme et accompagnent ainsi l'évolution de l'humanité. Pour cerner le rôle des matériaux sur la pensée, une nouvelle discipline, la matériosophie, s'est créée récemment. Elle repose sur l'idée de l'unification des trois règnes: végétal, animal et minéral comme dans un célèbre générique d'Arte. L'homme et la matière s'y retrouvent en osmose: union donc entre substance et force, version philosophique de la relation d'Einstein citée plus haut, et source d'inspiration créatrice. Son père, l'artiste philosophe Ariel Kupfer, la définit comme une indiscipline qui ne se laisse pas définir. Dans cet article on ne s'aventurera donc pas à le faire pour se contenter de montrer l'une des œuvres d'Ariel Kupfer l'illustrant au mieux (figure 9).



▶ Fig. 9: « Le Dragon », mercure, verre et mante religieuse, Ariel Kupfer, 2009.

Pour certains, la puissance de la pensée sur les matériaux est magnifiquement prouvée par les « cristaux d'Emoto », même si cela frise l'ésotérique. Il s'agit de cristaux de glace obtenus, récemment, par un médecin japonais, Masaru Emoto, à partir d'eau préalablement exposée à des pensées ou des musiques plus ou moins « positives ». Des bouteilles d'eau étiquetées « amour » ou « mort » ou ayant baigné dans du Bach ou du « hard rock » ont conduit à de beaux ou d'horribles cristaux (figure 10), une fois l'eau gelée. On



▲ Fig. 10: Cristaux de glace obtenus par Emoto, fruits de leur émotion.

de devrait donc plutôt appeler les cristaux d'Emoto, les cristaux émotifs. La validité scientifique des expériences d'Emoto n'a pas été prouvée, mais le résultat est beau et symptomatique du courant pensée-matériaux.



▲ Fig. 11: Anagyre.

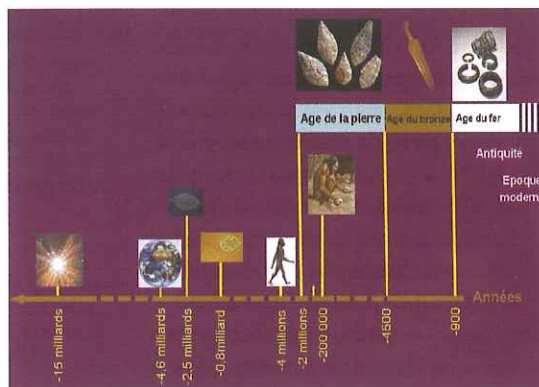
Toujours dans le domaine des croyances, celles associées au matériau de corne de rhinocéros, relèvent du magique. Ce qui l'est moins est que son utilisation dans des rites initiatiques de certaines religions, a entraîné un massacre à grande échelle des rhinocéros. C'est d'autant plus dommage que le matériau constituant cette corne est parmi les plus extraordinaires comme on le verra plus loin. Un autre bel exemple de matériau magique est l'anagyre ou pierre celte ou simplement « celt » (figure 11), utilisé initialement par les druides pour affirmer leurs pouvoirs magiques. Passez-moi le « celt » pouvaient-ils dire en un calembour qui n'en manquait pas (de « celt »). La magie vient de ce que l'objet, construit d'une certaine façon (assurant une inertie asymétrique) ne peut tourner que dans un sens, connu de son seul utilisateur. Dans l'autre sens la rotation s'arrête rapidement. On imagine aisément le parti que l'on peut tirer de cela: pour jouer les oracles, par exemple, comme les druides autrefois, ou, plus récemment, pour des jugements expéditifs, pendant l'Inquisition par exemple.

Les matériaux traversent donc les âges et servent à l'homme à assouvir ses desseins. Juste pour fixer les idées, il est

bon d'avoir en tête quelques repères chronologiques dans l'histoire de l'humanité qui tracent aussi celle des matériaux (figure 12).

Le Big Bang, voilà 15 milliards d'années, à quelques années près, est associé à la création de la matière. Une seconde après le Big Bang sont apparus les neutrons, protons, électrons. Puis vient la naissance de la Terre à -4,6 milliards d'années avec dans la foulée -une grande foulée- les premiers organismes vivants et leurs résidus sous forme de matériaux amorphes, à 0,8 milliards d'années. On rencontre, saisissante rencontre s'il en fut, l'Australopitèque à -4 millions d'années puis l'Homo Sapiens qui traverse les âges de la pierre, du bronze et du fer -entre -2 millions et l'Antiquité- avec leurs objets/matériaux caractéristiques. Enfin vient l'époque dite moderne qui est surtout traitée dans cet article.

Des âges primitifs, ou premiers comme on les appelle maintenant -pourquoi pas tendres, d'ailleurs- on ne montrera que ces couteaux/armes fabriqués à partir de dents d'animaux (figure 13) pour introduire la biomimétique dont l'importance va croissant.



▲ Fig. 12. Repères chronologiques dans l'histoire de l'humanité.

La biomimétique, nom issu du grec *bios* (vie) et *mimesis* (imitation), est la discipline visant à imiter la nature pour résoudre quantité de problèmes rencontrés par l'homme au quotidien. À l'origine présentée comme une sous-discipline de la chimie organique, elle s'est étendue à la technologie dans le sens le plus large du terme: la science des matériaux en prenant

▼ Fig. 13: Poignards primitifs fabriqués en dents de carnivores.



aujourd'hui la part majeure. Elle est considérée comme une science à part entière depuis une dizaine d'années seulement, sous l'impulsion de sa grande prêtresse,

l'Américaine Janine M. Benyus, et de la prise de conscience écologique actuelle et mondiale. L'homme pour et par les matériaux a copié la nature depuis toujours.

De l'ère primitive jusqu'à nos jours, cet article ne donnera que quelques autres repères rapides et subjectifs dans le développement des matériaux liés à l'activité et l'esprit humains. On peut mentionner, tout d'abord, la contrefaçon qui remonte au temps de Carthage (v^e siècle av. J.-C.) avec des imitations de monnaies d'argent en alliage à base de cuivre. Plus tard, le pillage par les barbares (Goths et Lombards en tête) des villas italiennes au vi^e siècle, a bien révélé la quête par l'homme de produits rares. Il s'agissait, là, de perles bleues obtenues par concassage des mosaïques décorant ces villas. La couleur bleue est rare, en effet, comme l'atteste le petit nombre d'œuvres et d'ouvrages l'utilisant au naturel. Les sources minérales de bleu se résument, en effet, au lapis-lazuli et à l'azurite et les barbares n'avaient d'autre recours que la destruction des mosaïques pour y trouver la matière première. On peut citer, enfin, plus proche de notre époque et de son esprit, le goût de la protection avec les couteaux japonais « kosuka » de Takasago. Ces couteaux datent du xix^e siècle et étaient faits de cuivre patiné noir. Ce matériau exceptionnel n'a subsisté qu'en Asie où le secret de fabrication y fut gardé.

Les temps récents ont montré deux époques: celle du plastique et celle du silicium. Le tout premier plastique fut la bakélite dans les années vingt, pour les postes de TSE. L'ère du silicium commença dans les années cinquante grâce au développement de l'électronique. Elle se prolonge un peu aujourd'hui du fait de l'obsession de jeunesse croissante de l'homme, le silicium entrant dans la composition de crèmes cosmétiques. Une crème cosmétique de la marque Nickel (publicité non payée) -encore un matériau- résume donc bien, par son nom doublement évocateur de « Silicon Valley », la fin du xx^e siècle au goût de silicium.

L'astronaute sur la lune symbolise au mieux la charnière entre les deux époques, « plastique » et « silicium ». Sans ces deux matériaux qui ont marqué le xx^e siècle, la conquête spatiale aurait été impossible. ■

Des nanomatériaux au Big Crunch via la biomimétique

Michel Jeandin,

Directeur de recherches à l'École des Mines de Paris

Deuxième partie d'une conférence donnée au Centre des Conférences Pierre Mendès-France à Bercy.

I - LES NANOMATÉRIAUX

Ce sont des objets ou des matériaux qui entrent dans la réalisation d'objets de dimension, par convention, inférieure à 100 nanomètres (nm) : le nanomètre étant le milliardième de mètre. Pour se représenter ce qu'est un nanomètre, on peut dire qu'il correspond à la taille de 4 atomes de silicium côte à côte ou encore qu'il est environ 50 000 fois plus petit que le diamètre d'un cheveu. Passer de l'échelle humaine à l'échelle nanométrique revient à ramener la Terre aux dimensions d'une bille de billard. Les nanomatériaux sont naturels ou issus des nanotechnologies. Quand on change d'échelle, pour une balle par exemple, le rapport de la surface/volume change. En changeant de volume on gagne de la surface. De plus, dans notre monde, la balle rebondit sur le mur, tandis que, dans le monde « nano » ou nanomonde, la réalité de la physique classique n'est pas toujours valable : la balle va aussi traverser le mur, être ailleurs et nulle part à la fois. C'est la physique quantique qui décrit cette nouvelle réalité. Il faut alors abandonner la conception holistique des choses comme l'avait prônée, en leur temps, Kant et Goethe : c'est-à-dire considérer que les caractéristiques d'un ensemble ne peuvent être connues que lorsqu'on le considère dans sa totalité, et non pas quand on en étudie chaque partie séparément. Dans le monde nano, les propriétés des matériaux peuvent être totalement différentes. La révolution des nanotechnologies est de repasser à notre échelle en assemblant brique par brique des éléments nanométriques aux propriétés souvent extraordinaires du fait de leur taille. Par exemple, l'or, conducteur à la base, devient isolant

à l'échelle nanométrique. Une céramique comme la silice, passe d'un comportement fragile à un comportement ductile (où elle est capable de s'allonger considérablement). La fabrication traditionnelle d'objets par enlèvement de matière laisse la place à une construction par assemblage des briques nanométriques déjà citées. En utilisant une métaphore artistique, on pourrait dire que l'on est plus dans l'accumulation à la Arman plutôt que dans la sculpture classique à la Praxitèle ou Rodin. Plus prosaïquement, l'usinage à partir d'un tronc d'arbre comme le pratiquait Tintin ou les bûcherons canadiens pour réaliser respectivement une hélice ou un cure-dent, n'est pas de mise dans le nanomonde.

L'idée de l'assemblage de nanobriques pour obtenir des matériaux aux propriétés inconnues jusqu'alors offertes a fait suite aux travaux de Harold Kroto dans le milieu des années quatre-vingt et qui lui ont valu le prix Nobel de chimie en 1996.

II - HAROLD KROTO, PÈRE DES NANOTECHNOLOGIES

Sa découverte pionnière fut d'avoir remarqué que les atomes de carbone pouvaient, dans certaines conditions, se grouper pour aboutir à un matériau appelé fullerène. L'originalité d'un fullerène est de présenter une structure sphérique, que l'on pourrait qualifier de brique nanométrique (si tant est que l'on puisse appeler brique, une sphère) à partir des 60 atomes de carbone la constituant : à la différence des atomes

de carbone dans la nature qui se regroupent suivant des plans pour former du graphite comme dans les mines de crayon ou, plus rarement, du diamant, le fullerène tire son nom de sa structure qui s'apparente à celle du pavillon des États-Unis à l'exposition internationale de 1967 à Montréal, conçu par l'architecte Samuel Fuller (figure 1 a). Plus simplement, cette structure est celle d'un ballon de football, version grande

époque, c'est-à-dire 1998, l'année à laquelle la France gagna la coupe du monde (figure 1 b).

Au-delà de leur intérêt pour les constituants massifs, les structures nanométriques ou nanostructures ouvrent aussi la voie vers des propriétés de surface unique. Ainsi, avec un relief superficiel nanostructuré, les matériaux textiles peuvent devenir hydrophobes, sans pour cela voir leur nature altérée. Le coton reste du coton, la soie de la soie, etc. puisque l'effet hydrophobe, dit « effet lotus », résulte d'un simple traitement morphologique superficiel. L'eau glisse, en effet, sur le textile sans l'imprégner comme elle le fait sur la feuille de lotus ou sur une peau de pêche (si Newton avait dû glisser sur une peau de fruit, cela n'aurait donc pu être sur une peau de pêche). Des vêtements sont d'ores et déjà commercialisés. Il est certain que si Gene Kelly avait « chanté sous la pluie » portant un costume de ce genre, le cinéma aurait perdu l'une de ses scènes d'anthologie.

Ces mêmes questions d'adhérence sont aussi bien illustrées par un autre animal, le gecko. Le dessous des pattes de ce lézard présente, en effet, une morphologie particulière en lamelles recouvertes de fibres nanométriques. Ces lamelles adhèrent aux surfaces sur lesquelles elles reposent par effet ventouse. En 2006, des chercheurs de l'Université de Californie/Berkeley ont pu produire, grâce aux nanotechnologies, des fibres en polypropylène présentant des propriétés d'adhérence analogues. Des robots geckos se déplaçant comme l'animal vivant ont pu ainsi être réalisés. Sur cet exemple, on constate que les nanomatériaux contribuent à la biomimétique.

III - LES APPLICATIONS DES NANOMATÉRIAUX

● Toujours en jouant sur ses propriétés de surfaces, les nanomatériaux peuvent servir à la **restauration artistique**. Il suffit pour cela d'imprégner la zone à restaurer où le temps et/ou l'humidité ont érodé la matière, avec des nanoparticules



▲ Fig. 1 : Structures fullerène :
a) pavillon US à l'expo de Montréal de 1967,
b) logo de la coupe du monde 1998, avec ballon « fullerène ».

en suspension dans un solvant organique. Il peut s'agir d'hydroxyde de calcium en suspension dans de l'isopropanol comme dans le cas de la restauration de fresques du XVII^e siècle, au Palais Pitti de Florence, dirigée par le professeur Baglioni de l'Université de Florence. La restauration résulte de la recombinaison chimique de la matière (figure 2). Les nanoparticules ont la même composition que les pigments d'origine qui ne voient pas leurs propriétés physiques et chimiques modifiées par l'opération.

Ce type de restauration à l'échelle nanométrique est d'autant plus appréciable que le talent de l'artiste s'exprime souvent à une échelle de dimension très fine. C'est pour cette raison que le célèbre « sfumato » de Léonard de Vinci n'a révélé tous ses secrets que très récemment. Ce fut à l'été 2010 grâce à l'analyse par fluorescence X de la Joconde au laboratoire de recherche des musées de France au Louvre. L'analyse a montré que Léonard de Vinci pouvait utiliser jusqu'à 30 couches très fines (moins de quelques dixièmes de mm d'épaisseur) superposées pour provoquer des effets : couche de glacis, couche de vernis, etc. Pour l'anecdote, on peut dire que, grâce à ce type d'analyse de plus en plus précise d'œuvres picturales, le président du comité italien pour la valorisation des biens historiques, Sylvano Vincenti, a relancé une fois de plus, l'hypothèse selon laquelle La Joconde serait un homme. Par analyse d'images, en effet, des yeux de la Joconde, les lettres L et S pour, respectivement, Leonardo et Salai (son assistant qui aurait donc posé) y ont été détectées. Dans le domaine des énigmes artistiques, celle de l'assombrissement des fameux jaunes de Van Gogh vient d'être résolue (publication en 2011). La dégradation avec les années a aussi à voir avec les nanomatériaux. Des analyses de pigments nanométriques au synchrotron de Grenoble ont permis de voir que c'était, en fait, le blanc que Van Gogh ajoutait à son jaune, pour l'éclaircir, qui était le fautif. Ce blanc, en effet, s'assombrit avec le temps à cause du baryum et du soufre qu'il contient : blanchir pour assombrir donc paradoxalement.

Peut-être moins artistique, une autre forme de restauration est celle de la peau. Les nanoparticules y interviennent par l'oxyde de titane (TiO₂) nanométrique que contiennent un grand nombre de crèmes solaires. L'oxyde de titane a été choisi pour sa couleur blanche propre à la plupart des crèmes et à sa transparence aux « bons » rayons ultraviolets bronzants.

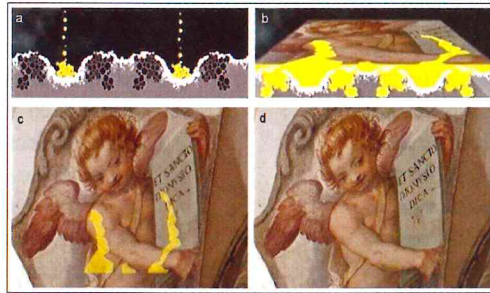
Cette application des nanoparticules est emblématique de leur utilisation croissante dans l'industrie des cosmétiques.

Cependant, on se pose aujourd'hui la question de leur innocuité : les nanoparticules ne traversent-elles pas la peau et ne sont-elles pas source de maladies comme peut l'être l'amiante ? Rien n'est moins sûr et cela témoigne des craintes soulevées par l'emploi des nanomatériaux comme l'article le développera plus loin.

Le domaine de la restauration mais, cette fois, dans le sens d'alimentation, fut l'un de ceux où les nanomatériaux ont percé le plus rapidement. Un aliment a, en effet, d'autant plus de goût qu'il présente une surface d'échange plus grande avec l'extérieur, les papilles gustatives de la langue, elles aussi très petites, en particulier. L'intégration d'aliments sous forme de nanopoudres (à grande surface mais très petit volume comme déjà mentionné), dans des plats cuisinés industriels permet ainsi d'en mettre moins, à goût égal. On comprend l'intérêt économique que peut représenter pour l'industrie alimentaire le développement de nutriments nanométriques. Elle les a adoptés dès le début des années 2000.

Les nanoparticules donnent plus de goût aux aliments et permettent de mieux les conserver, qui plus est. Il s'agit alors de nanoparticules bactéricides d'argent qui peuvent être mélangées aux aliments ou déposées ça et là sur les parois de réfrigérateurs jusqu'à en devenir, dans les 2 cas, des arguments publicitaires (figures 3a et 3b). Les premières réclames, dans les années cinquante (à cette époque on ne parlait pas de publicité), pour les réfrigérateurs annonçaient à la ménagère qu'elle gagnerait de l'argent grâce à son emploi (figure 3c). Le slogan « Mon réfrigérateur me fait gagner de l'argent » (cf. figure 3c) reste le même donc aujourd'hui si ce n'est que l'argent se trouve directement dans le réfrigérateur.

En dehors de toute allusion sociale, l'argent, ici aussi, inquiète : pour la santé s'entend. On ne sait, en effet, où se trouvent les nanoparticules (indétectables) ajoutées par les industriels, ni en quelle



▲ Fig. 2 : Principe de la restauration de fresque par dépôt de nanoparticules.

quantité. Dans le cas de l'argent, l'inquiétude augmente si l'on sait que les nanoparticules ont un pouvoir anticoagulant certain (le bon côté des choses étant, qu'à terme, elles pourraient avantageusement remplacer l'aspirine).

Pour rester dans les préoccupations médicales, on peut dire que le domaine de la médecine est probablement celui dans lequel les nanomatériaux et nanotechnologies engendrent le plus d'espoirs. Les nanoparticules peuvent jouer le rôle de médecins ou de chirurgiens intervenant *in situ* dans le corps humain, aux endroits seuls où il doit être soigné. Les nanoparticules, peuvent, en effet, par exemple : détecter et détruire des tumeurs, injecter localement des médicaments, ou encore cicatriser. La cicatrisation constitue un exemple encore de restauration mais dans le domaine médical, cette fois. La destruction de tumeurs malignes peut s'effectuer magnétiquement par vibration de nanoparticules, le patient ayant reçu une injection de ces nanoparticules et étant placé sous IRM (Imagerie par Résonance Magnétique). Les nanoparticules sont localisées dans les tumeurs car les vaisseaux sanguins à leur voisinage y sont poreux, se laissant ainsi traverser par les nanoparticules. C'est sur ce même principe que les tumeurs sont détectées grâce à l'utilisation de nanoparticules

fluorescentes détectables par simple radiographie. La vibration (à haute fréquence : 100 000 Hz) des nanoparticules provoque l'échauffement des tumeurs jusqu'à 43 °C, température à laquelle elles meurent. Plutôt que détruire, les nanoparticules, sous forme de nanocapsules, peuvent soigner par relargage local de (nano)

médicaments dans les zones malades. Actuellement, les nanocapsules les plus évoluées sont en silicium, profilées selon une forme optimisée par calcul. Cette forme leur assure une aérodynamique pour un déplacement aisé via les vaisseaux sanguins. Enfin, des nanoparticules (ou nanofibres), introduites dans le corps du patient par injection d'une solution les contenant, peuvent servir à la reconstitution de tissus, y compris nerveux ou neuronal greffe.



▲ Fig. 3 : L'argent dans la publicité sur fond bleu de nanoparticules d'argent : a) et b) Insertion de nanoparticules d'argent c) Réclame pour réfrigérateur.

IV - LA NANOÉLECTRONIQUE

Le domaine médical est le plus porteur pour les nanomatériaux et les nanotechnologies du fait des révolutions attendues. La nanoélectronique est aussi fortement porteuse mais probablement moins novatrice puisque se situant simplement dans le prolongement de ce qui fut dû à l'avènement du silicium. Depuis l'invention du transistor dans les années de l'après-guerre, leur nombre ne cesse de grandir dans ce que l'on appelle les puces électroniques. Selon la loi de Moore (Gordon Moore, fondateur d'Intel, célèbre fabricant de microprocesseurs "puces"), tous les 18 mois, la taille des puces électroniques est réduite de moitié tandis que leur puissance (soit leur nombre de transistors) est doublée. Aujourd'hui, une puce, de l'ordre du cm^2 classiquement, contient plus de 500 millions de transistors, donc plus du milliard dans les 1-2 ans à venir.

Une telle (pour ne pas dire « Intel ») densité constituera, cependant, une limite. Au-delà, l'isolation entre les différents circuits ne pourra plus être assurée suffisamment, la distance les séparant étant trop proche. Déjà aujourd'hui, les micro-circuit créés par leur proximité engendrent des échauffements intempestifs. Celui des ordinateurs portables en est un exemple frappant (chauffant). Le salut est à attendre des nanomatériaux et les nanotechnologies associées qui permettront, à l'horizon 2020-2025, la fabrication de microprocesseurs en trois dimensions par empilement de couches avec des fils de la dizaine de nm de diamètre.

Le développement de la nanoélectronique contribue en retour à celui des nanomatériaux. Plus l'électronique est puissante, en effet, et plus les calculateurs et les moyens d'observation de la matière qui les utilisent le sont aussi. Les scientifiques auront donc la faculté de mieux voir, simuler et analyser les nanomatériaux, aidant ainsi aux recherches pour les développer en un processus de récurrence vertueux.

V - L'INDUSTRIE MILITAIRE

Les nanomatériaux, marque du progrès scientifique, bénéficient, si l'on peut dire, à l'industrie militaire. Les services de la Défense (ou de l'Attaque) des pays les plus en pointe sont friands de tout ce que peuvent apporter les nanomatériaux et nanotechnologies. L'uniforme d'un militaire les résume assez bien. L'uniforme de demain (pour ne pas dire aujourd'hui) recouvrira complètement la peau du sol-

dat et sera composé de nanofibres très résistantes, tissées de nanocables électriques reliant entre eux une multitude de nanocapteurs en tous genres. Il le protégera des explosions, lui assurera une détection automatique des toxines, lui délivrera les médicaments nécessaires, le protégera des munitions et des flammes, régulera sa température, et soignera ses plaies, notamment. L'environnement du soldat (véhicules, blindages, etc.) profite aussi de l'essor des nanomatériaux. Il s'ensuivra inmanquablement le phénomène d'escalade classique entre défense et attaque, avec la classique (mais fondée) peur de l'escalade de la terreur. Cette peur ne

semble rien, cependant, comparée à celle qu'inspirent les nanomatériaux par eux-mêmes. En France, les manifestations, en février 2010 à Grenoble, furent véhémentes à la suite du moratoire sur les nano (figure 4).



▲ Fig. 4: la « Une » de « Métro », le 24 janvier 2010

VI - LA POLÉMIQUE AUTOUR DES NANOMATÉRIAUX

Aujourd'hui, une certaine paranoïa sévit parmi la population. Elle est née, aux États-Unis, de la parution, en 1991, d'une thèse de doctorat contestée rédigée par un scientifique contestable, Érik Drexler. Les peurs générées ont atteint le grand public après publication, en 2002 du roman « La Proie » par l'auteur à grand succès, aujourd'hui disparu, Michael Crichton. Ces peurs traduisent le sentiment classique que l'homme a joué à l'apprenti sorcier et qu'il se heurte, tel le docteur Frankenstein, à la révolte de ce qu'il a créé. Michael Crichton, dans son roman, annonce la fin de l'humanité sous l'invasion de nanoparticules, sous la forme d'un nuage gris (il emploie le terme « gelée grise » qui a fait florès depuis) qui la détruirait tel un virus foudroyant pourrait le faire.

VII - LA BIOMIMÉTIQUE

Les matériaux et les technologies associées progressent, maintenant, de plus en plus grâce à la biomimétique qui fait l'homme s'inspirer de la nature et non, comme jusqu'à maintenant, en aspirer les richesses pour en rejeter des déchets dont il expirera s'il ne réagit pas. Une île de déchets (plastiques principalement) grande comme la France, dérive, déjà, au gré des vents et courants dans le Pacifique, au large des États-Unis, comme un signe de la dérive humaine.

Dans la nature, il n'y a pas de tombeau, la vie ne s'arrête jamais et tout dé-

chet de l'un constitue de la nourriture et de l'énergie pour l'autre. Partout où la vie commence pour l'un, la vie commence pour l'autre. Ce principe du « berceau au berceau » est à la base de la science dite générative qui connaît un succès grandissant depuis la parution du livre fondateur de William McDonough et Michael Braungart intitulé « Cradle to Cradle: Remaking the Way we Make Things » (Paperback/2002), publié dans sa traduction française en 2011 seulement.

La biomimétique obéit à la philosophie C2C (« Cradle-to-Cradle ») ou B2B (« du Berceau au Berceau »). L'un des premiers propagandistes de la biomimétique fut La Fontaine, quand il vantait les mérites comparés du chêne et du roseau. La biomimétique explique pourquoi « l'arbre tient bon, le roseau plie » (28^e vers de la fable). Le tronc du chêne comme la tige du roseau présente une structure composite contenant vaisseaux, parenchymes et trous. Leur répartition y est plus régulière et symétrique chez le roseau par rapport au chêne lui conférant ainsi certaines qualités de résistance dont est dépourvu le chêne.

L'exemple parfait de composite naturel reste, cependant, la corne de rhinocéros, les constituants en étant 2 types de kératines (groupement de protéines aussi à la base des ongles ou des cheveux). La perfection de sa structure a, probablement, contribué à faire croire à l'homme en des pouvoirs magiques de la corne. Ces pseudo-pouvoirs n'ont eu que pour effet d'avoir décimé les troupeaux de rhinocéros pour cause, notamment, d'utilisation de la corne dans des rites initiatiques religieux au Moyen-Orient.

Plus prosaïque mais plus bénéfique aussi fut le développement de matériaux composites fabriqués de la main de l'homme s'inspirant, biomimétiquement, de microstructures composites comme on vient de les décrire. Une parfaite homogénéité et l'absence de défauts ne sont pas encore au rendez-vous. Malgré tout, depuis plus de 30 ans, les composites s'imposent de plus en plus dans de nombreux secteurs de l'industrie: industrie des loisirs (individuels ou collectifs), aéronautique, automobile, énergie...

Leur intérêt est de présenter des propriétés combinées, à partir de celles de leurs constituants: par exemple, légèreté et haute résistance dans le cas d'un composite à matrice plastique renforcée par des fibres.

Pour atteindre la perfection des composites naturels, l'idéal est de produire les

matériaux comme peut le faire la nature. La manipulation génétique y parvient aujourd'hui pour, par exemple, la production de la soie d'araignée (communément appelée fil). La soie d'araignée présente des propriétés extraordinaires: 5 fois plus légère que l'acier mais 5 fois plus résistante, avec une capacité d'allongement colossale (>40%). Si on la ramenait à l'échelle humaine, une toile d'araignée serait un filet capable d'arrêter un avion en vol. Ces propriétés résultent de sa structure composite en fibres polycristallines (protéines allongées).

Au départ, le gène d'araignée est introduit dans des embryons de chèvres qui sont, par la suite, implantés dans des mères porteuses. À leur naissance, les chevreaux sont devenus les fondateurs d'une lignée porteuse de gènes d'araignées. Ces chèvres transgéniques produisent ensuite, dans leur lait, la protéine de fil d'araignée qui n'a plus qu'à être mise en forme. Une société canadienne (Nexia) produit ainsi actuellement ce genre de fibre/fil pour être tissée afin d'obtenir des matériaux ultra-résistants.

La structure en toron de la soie d'araignée est aussi celle des fibres musculaires qui a été retenue, en génie civil, pour la confection des câbles de ponts.

Les exemples fourmillent (la nature influence la langue aussi) où la nature a inspiré le développement de nouveaux matériaux. On n'en citera que quelques-uns en guise de description de l'approche biomimétique:

- L'animal vedette dans les livres et cours de biomimétique, plus que l'araignée encore, est l'ormeau parce que la paroi interne de sa coque possède des propriétés encore inégalées: dureté, réfractarité, résistance à l'usure, inertie vis-à-vis de l'environnement... Chacun connaît les coques d'ormeau joliment nacrées employées comme cendriers. On s'est aperçu que, à condition de pouvoir reproduire ses propriétés, les applications iraient bien au-delà. La qualité de la coque d'ormeau vient, ici encore, du caractère composite de sa structure, faite d'empilement de petites briques à haute résistance. Aujourd'hui, seuls les composites dits « céramique-céramique » utilisés dans l'aéronautique, s'en approchent. Les études visant à synthétiser la coque d'ormeau continuent.

- Les matériaux, formant le système dit Velcro® (VELours-CROchets) ont été mis au point après que son inventeur (Georges de Mestral) ait observé que

les fleurs de bardane s'accrochaient au tissu de son pantalon et aux poils de son chien lors de ses fréquentes promenades champêtres.

- Des éponges au pouvoir ultra-absorbant (plusieurs dizaines de fois la capacité des éponges classiques) ont été, récemment (2010), découvertes dans le fond Antarctique. Les biomiméticiens essaient depuis de découvrir leur secret. Ils ont pour l'instant surtout découvert l'humour de les appeler « *Stylocordyla chupachups* » à cause de leur ressemblance avec les célèbres sucettes.

- Les matériaux peuvent obéir à un « *design* » évolué grâce à leur facilité de mise en forme. Le Canadien Stephen Dewar, a le premier vu l'intérêt de s'inspirer des baleines à bosse pour concevoir des pales d'éolienne à tubercules dont le rendement se trouve ainsi très amélioré.

- La dernière voiture concept (« *concept car* ») de Mercedes, en 2010, s'est inspirée du poisson coffre, l'armature ajourée rappelant celle de crânes d'animaux ou l'os est présent uniquement là où il est nécessaire (figure 5). Le plus étonnant est que cette démarche a précédé la recherche de forme et de composition sur ordinateur, qui en a, ensuite, confirmé l'intérêt d'un point de vue technique.

- De multiples autres exemples de développement faisant appel à la biomimétique pourraient être donnés. On ne mentionnera que les nouveaux écrans antireflets de téléviseur, dont la structure est analogue à celle des yeux de papillon de nuit. Les murs de certains édifices comme le Centre de congrès « *Durian* » de Singapour, sont structurés comme les poils de l'ours blanc. Ils agissent comme des régulateurs thermiques grâce à leur ressemblance à des fibres optiques.

L'ambition des biomiméticiens est maintenant de se rapprocher du « *vivant* », en particulier en reproduisant l'une de ses qualités les plus remarquables: l'auto-réparation. C'est déjà le cas avec le développement (très récent, 2010) de polymères supra moléculaires qui, après rupture, peuvent se recoller par simple contact. Les premières applications en seront leur utilisation dans la fabrication de pièces (joints par exemple) qui se « *guériront* » de leurs blessures (fissures entre autres) pendant le fonction-

nement de la machine qu'elles équiperont.

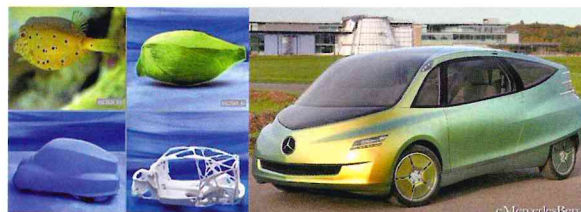
L'auto-réparation est sur la route de l'auto-fabrication avec, en perspective, l'invention d'un équivalent au génome, c'est-à-dire un système artificiel doué de ce pouvoir incroyable de reproduire des structures à partir de règles définies. Ce sera difficile mais ce n'est plus utopique. Il y a pire, cependant, que l'utopie, c'est ce qui ne se réalise pas. Les biomiméticiens, sans être divins, se font forts de le réaliser.

Les matériaux se développeront donc encore longtemps. D'aucuns ont pu dire qu'ils seraient remplacés petit à petit, au moins au stade de leur conception, par leurs analogues virtuels: les informaticiens se substituent aux ingénieurs « *matériaux* » et autres biomiméticiens, en quelque sorte.

Les spécialistes des matériaux et les expérimentateurs ne disparaîtront pas et resteront les seuls à pouvoir nourrir les ordinateurs susceptibles de simuler des structures en différents matériaux; par exemple, ceux d'un Airbus ou d'échantillons microscopiques. Un intérêt majeur de la virtualité est de pouvoir concevoir, observer, analyser le matériau en 3D (dans ses 3 dimensions donc), à l'instar de ce que montre le cinéma actuel. On en revient presque au temps d'Archimède dont, pour l'anecdote, on a célébré le 2222^e anniversaire de la mort, en 2010.

Archimède, et tel était son génie, partait, en effet, toujours de considérations 3D pour la démonstration de ses lemmes et théorèmes.

La virtualité menace donc les matériaux. Cependant, la plus grande menace pour le matériau en tant que tel est le matériau lui-même. En effet, qui dit matière dit antimatière. La rencontre des deux conduira à ce que l'on pourrait appeler le non-matériau, le néant peut-être. Expérimentalement, des particules d'antimatière ont déjà été mises en évidence. Ces expériences se développent: au CERN/Genève notamment, la dernière en date, toujours en cours, étant l'expérience dite Alpha. L'évolution des matériaux suivra donc bien celle de l'humanité puisque la logique veut que la matière rencontre l'antimatière un jour. L'homme y aidera. Le Big Crunch, sorte de Big Bang inversé, en résultera. C'est aux physiciens et aux philosophes d'en parler: à l'occasion d'autres articles ou conférences, peut-être... ■



▲ Fig. 5: Mercedes et poisson coffre

REVUE DE L'AMOPA

Congrès INTERNATIONAL 2012
ALSACE COLMAR ALSACE

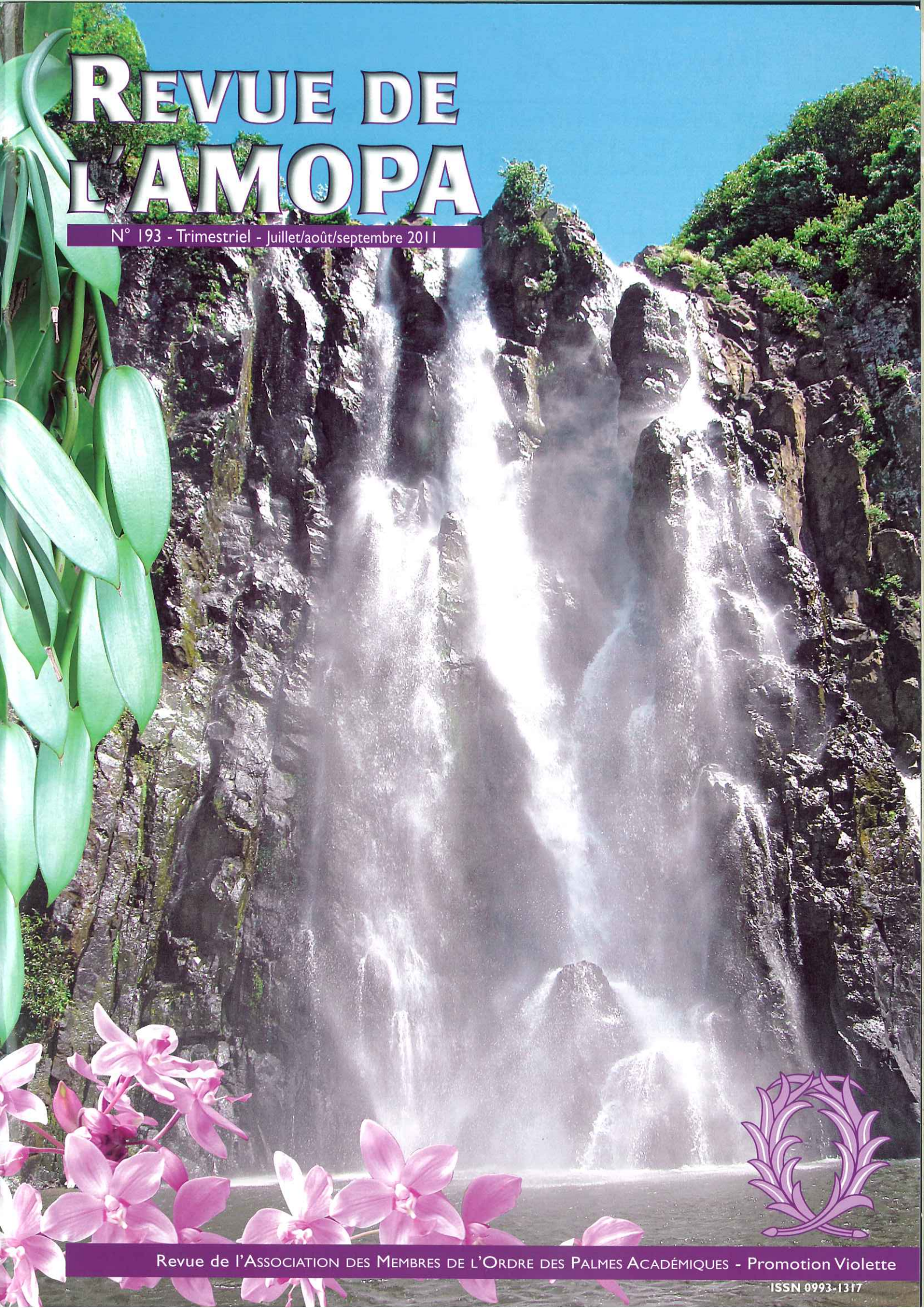


N° 194 - Trimestriel - octobre/novembre/décembre 2011



REVUE DE L'AMOPA

N° 193 - Trimestriel - Juillet/août/septembre 2011

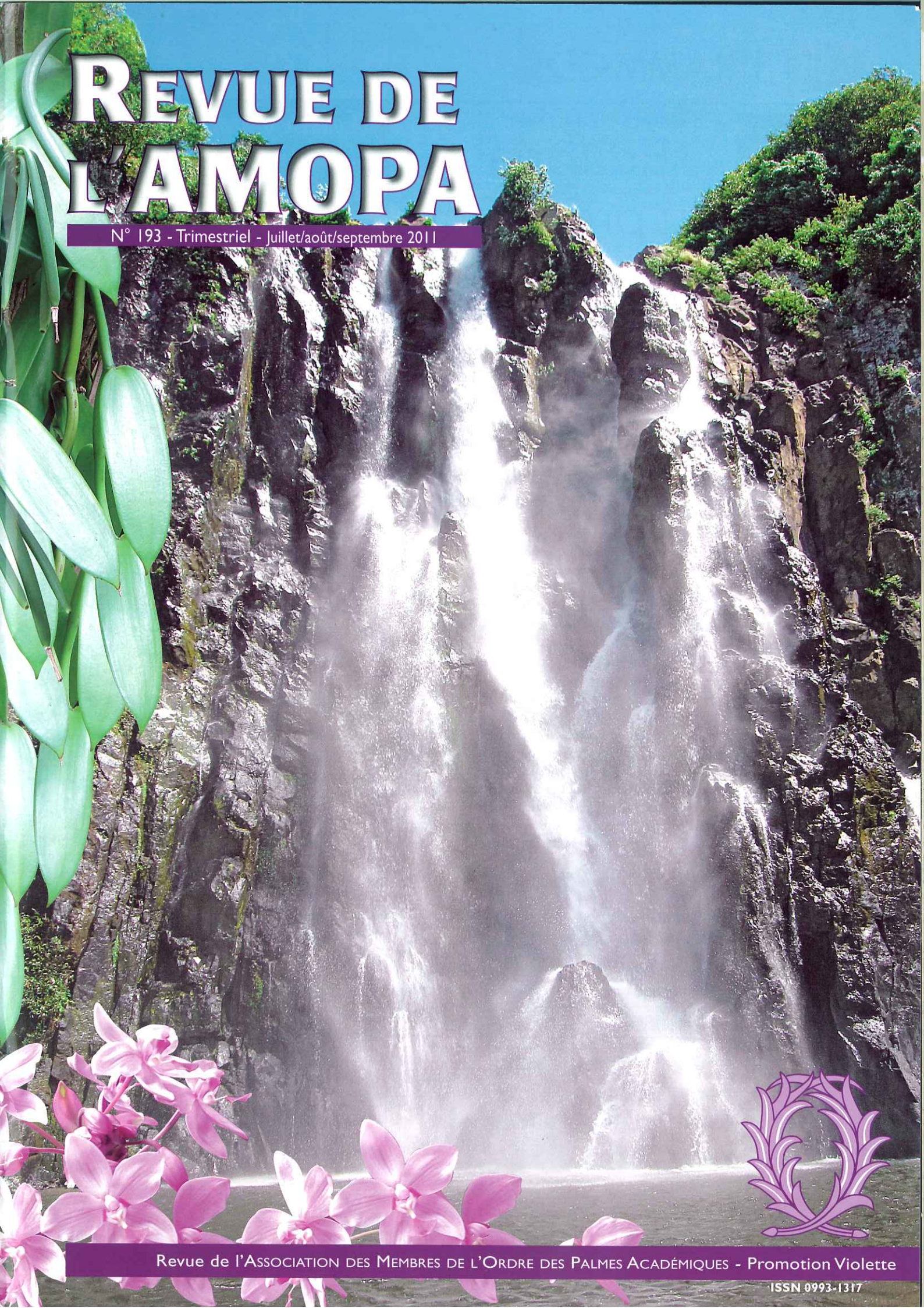


Revue de l'ASSOCIATION DES MEMBRES DE L'ORDRE DES PALMES ACADÉMIQUES - Promotion Violette

ISSN 0993-1317

REVUE DE L'AMOPA

N° 193 - Trimestriel - Juillet/août/septembre 2011



Revue de l'ASSOCIATION DES MEMBRES DE L'ORDRE DES PALMES ACADÉMIQUES - Promotion Violette

ISSN 0993-1317