

## Les Matériaux de demain

*La science et l'ingénierie  
des matériaux*

*Les matériaux métalliques  
et leurs procédés*

*Les matériaux et l'énergie*

*Les nanomatériaux connectent  
les mondes réel et virtuel*

*Le verre : un matériau vieux comme  
le monde, domestiqué par l'homme*

*Les matériaux issus du carbone*

*Les matériaux et le vivant*

*L'économie et les matériaux*

## Présentation du magazine *Les matériaux de demain*



**Jean-Marie Dubois est directeur de recherche émérite du CNRS et académicien de l'ALS. Métallurgiste, il a consacré sa recherche aux alliages exotiques (verres métalliques, composés complexes, quasicristaux). Il a fondé l'Institut Jean Lamour qu'il a dirigé jusqu'à fin 2012.**

1/ J.M. Dubois, L'Institut Jean Lamour, sa vie, son œuvre, in : <http://www.academie-stanislas.org/14-15/Dubois.pdf>

2/ La Vallée Européenne des Matériaux, de l'Energie et des Procédés désigne autant la région qui s'étend de Thionville à Epinal où sont localisés les acteurs de ce renouveau que l'entité contractuelle qui régit le développement de cet écosystème (voir : <http://www.pactelorraine.eu/la-vallee-europeenne-des-materiaux-et-de-energie-ve-me/>)

3/ Les Anglo-saxons les désignent sous le vocable de Smart materials.

4/ Il faut inventer la route avant de se mettre en chemin, J.F. Bernardini, I Muvrini.

De l'âge du silex à celui du silicium, les matériaux ont été l'une des clés du développement humain et le socle de nombreuses civilisations<sup>1</sup>. Dans la région Grand Est, et tout particulièrement en Lorraine et Alsace, les visées expansionnistes d'un puissant voisin, à l'époque conquérant mais privé de matières premières en quantités suffisantes, ont conduit aux horreurs que l'on sait durant les trois guerres qui se sont succédé sur notre sol durant les 19<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> siècles. C'est dire l'importance que revêtent les matériaux autant pour le développement harmonieux de nos sociétés que pour les équilibres géo-politiques qui le garantissent.

Les mines de fer et de charbon, le chlorure de sodium et la soude, les sables siliceux, le bois et les fibres naturelles, la potasse, d'autres encore, ont assuré la croissance d'importantes industries de production dont la pertinence stratégique n'a pas été remise en question durant des décennies, jusqu'aux environs de la fin des trente glorieuses. Puis la concurrence internationale, impitoyable en particulier pour notre sidérurgie et notre industrie textile, a fait quasiment disparaître cet outil de production et les emplois qui en dépendaient. Seuls sont restés le souvenir et l'amertume, dans un premier temps, puis la volonté farouche de recouvrer, si ce n'est la force productive, du

moins la maîtrise de l'intelligence, de l'innovation, quelquefois de la propriété intellectuelle. A défaut de voir fleurir sur son sol les usines à jamais disparues, la région Grand Est et tout particulièrement la Lorraine avec sa Vallée<sup>2</sup> ont pris en main le destin de la science et de l'ingénierie qui fournissent les clés du développement de matériaux avancés, durables, respectueux de l'environnement et surtout intelligents<sup>3</sup>.

L'Académie Lorraine des Sciences a souhaité dédier la 6ème édition de son magazine biennal aux matériaux. Ce choix vient en résonance avec l'inauguration prochaine de l'Institut Jean Lamour à Nancy, le plus grand (en termes de personnel) institut français de recherche publique sur les matériaux et procédés<sup>4</sup>. Si cet institut est assurément un fleuron de la science et de l'ingénierie des matériaux en Europe, dont l'aura dans ces disciplines est plus en devenir qu'acquise, il ne constitue pas - loin s'en faut - la seule initiative marquante des deux dernières décennies en la matière. L'Institut Lafayette à Metz, le Pôle de Plasturgie de l'Est en Moselle du nord, le Cirtes à St Dié, l'ENSTIB à Epinal, l'Institut de Recherches Technologiques M2P et Metaforsch, les pôles de compétitivité comme Materialia et Fibres Naturelles Grand Est, les admirables instituts Carnot que sont ICEEL et MICA, etc. sont autant d'initiatives qui

marquent la volonté des acteurs du Grand Est de se positionner au plus haut niveau international sur le créneau des matériaux intelligents, c'est-à-dire ceux des matériaux qui supportent la meilleure science tout en étant utiles à l'enseignement, et en même temps soutiennent l'innovation et la compétitivité de nos industries.

C'est ce cadre général que ce magazine cherche à présenter et à illustrer. Faute de place, nous avons dû choisir et nous limiter à un nombre restreint des domaines scientifiques et techniques abordés en Grand Est dans le domaine de la science des matériaux. Ainsi, ne seront pas traités des matériaux aussi importants que le bois et les plastiques, en dépit de leur considérable impact industriel, car il eut fallu leur consacrer un magazine entier. Les produits issus de la chimie, qui sont des précurseurs des matériaux lorsqu'il s'agit du pétrole ou de la houille, maintenant de la biomasse, ou encore les alcalins, ne seront pas plus évoqués. Les choix que nous avons arrêtés concernent d'autres types de matériaux : les alliages métalliques, les matériaux pour l'énergie, les nanomatériaux pour l'électronique ultime, les verres, les matériaux issus du carbone et ceux liés au monde vivant. L'ensemble est introduit par une présentation générale d'un maître du genre, le Professeur Y. Bréchet, Haut

Commissaire à l'Energie Atomique. Une conclusion est formulée sur l'impact économique des matériaux par J.L. Pierquin, ancien industriel et spécialiste de ces questions. Enfin, quelques encarts, à la fois illustratifs et condensés, viennent égayer la lecture de ce volume.

Il me reste à remercier vivement tous les auteurs de ce magazine, M. D. Mattioli qui a mis un soin particulier à sa mise en page et aux illustrations ainsi que mes confrères et concœurs de l'ALS qui m'ont aidé à l'éditer. Le Dr André Rossinot, ancien maire de Nancy, ancien ministre, fondateur et président actuel de la Métropole du Grand Nancy a bien voulu signer l'éditorial. Cette action prolonge celle qu'il a toujours mise au service du développement de la science et de l'ingénierie des matériaux à Nancy et bien au delà. Fin connaisseur des dossiers complexes d'urbanisme comme des arcanes politico-administratifs de notre pays, sa volonté et son énergie nous ont permis de surmonter bien des obstacles sur la route du renouveau des matériaux en Lorraine, lorsqu'ensemble nous avons inventé le chemin<sup>4</sup> qui a mené à l'ouverture de l'Institut Jean Lamour. Qu'il en soit ici infiniment remercié.

**Jean-Marie Dubois,**  
Académie Lorraine des Sciences, Nancy.

### SOMMAIRE

ÉDITORIAL	4
LA SCIENCE ET L'INGÉNIEURIE DES MATÉRIAUX : DE L'HISTOIRE À LA PROSPECTIVE	6
LES MATÉRIAUX MÉTALLIQUES ET LEURS PROCÉDÉS	10
SCIENCE DES MATÉRIAUX NUMÉRIQUE	16
LA CÉRAMIQUE	17
LES MATÉRIAUX ET L'ÉNERGIE	18
LES DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES	24
LES CATALYSEURS	25
LES NANOMATÉRIAUX CONNECTENT LES MONDES RÉEL ET VIRTUEL	26
LE VERRE : UN MATÉRIAU VIEUX COMME LE MONDE ET DOMESTIQUÉ PAR L'HOMME	30
LES MATÉRIAUX ISSUS DU CARBONE	34
LA SIMULATION NUMÉRIQUE ET LE MATÉRIAU VIVANT	39
LES MATÉRIAUX ET LE VIVANT	40
L'ÉCONOMIE ET LES MATÉRIAUX	44
INVENTION ET INNOVATION	49
L'ACADÉMIE LORRAINE DES SCIENCES	50

## Éditorial



**Ancien député, ministre à deux reprises, ancien président du Parti Radical, le Dr André Rossinot a été maire de Nancy de 1983 à 2014. Il préside aujourd'hui la Métropole du Grand Nancy. Très attaché à promouvoir une économie de la connaissance permettant d'expliquer à nos concitoyens et aux jeunes générations le sens profond des découvertes et innovations liées aux équipes de recherche de notre territoire connectées au monde entier, il a souhaité livrer son regard personnel vis à vis de ce numéro de l'ALS coordonné par J.M. Dubois, en signe de profonde gratitude et reconnaissance pour le rôle joué par celui-ci, notamment dans la création de l'Institut Jean Lamour.**

Je voudrais remercier l'équipe de l'Académie Lorraine des Sciences et sa Présidente Dominique DUBAUX en tête, secondée par son Bureau et Conseil d'Administration qui m'ont ainsi, avec l'aimable autorisation du Directeur de la rédaction de cette publication - Jean-Marie DUBOIS - ouvert leurs colonnes au sein d'un numéro consacré à l'un des domaines d'excellence les plus emblématiques à l'échelle de notre bassin de vie et venant d'ailleurs conforter la montée en puissance de notre nouvelle Métropole - les Matériaux - pour vous faire part, en quelque sorte, de ma vision politique en la matière.

C'est donc volontiers que j'ai répondu favorablement à une telle proposition, et ce avec une facilité d'autant plus naturelle que s'était tenue, quelques mois auparavant, à l'initiative conjointe d'ailleurs de la Métropole et de l'ALS, une Séance exceptionnelle organisée au Grand Salon de l'Hôtel de Ville de Nancy, réunissant, sur un thème d'actualité - « Des matériaux pour demain : défis, progrès et interrogations » - un certain nombre d'intervenants et d'experts reconnus dans des spécialités souvent très pointues.

A cette occasion, savants, chercheurs, universitaires de talent, inventeurs et chefs d'entreprise se sont succédé au micro et à la tribune pour nous

faire part de leurs découvertes, de leurs expérimentations, de leurs convictions, dans un champ d'activité majeur de la recherche d'aujourd'hui, avec des bouleversements technologiques accélérés prenant la forme de la miniaturisation et du numérique, dont nous n'avons pas fini de mesurer les retombées directes et concrètes sur la vie quotidienne ainsi que sur la manière d'agir et de penser de nos concitoyens à travers le monde.

Evoquer les Matériaux n'est pas le fruit du hasard puisqu'avec le charbon, l'acier, le fer - il n'est qu'à se remémorer l'épopée artistique et industrielle d'un homme comme Jean PROUVE - présents dans le sous-sol lorrain (on a même pu parler aussi de pétrole, voire de gaz de schiste et de houille) pour montrer en quoi notre territoire a intrinsèquement partie liée avec cet univers de la production qui trouve à nouveau - dans la continuité de l'aventure collective de l'Ecole de Nancy et de la période de prospérité des 30 Glorieuses, malgré les difficultés d'une reconversion inachevée et socialement dévastatrice - des débouchés prometteurs.

Car tel est bien le sens profond de cette révolution culturelle, pédagogique et intellectuelle d'ARTEM<sup>1</sup> qui, au-delà même des fertilisations croisées et décloisonnements désormais favorisés dans les formations et apprentissages, témoigne des liens

étroits, anciens et profonds entre l'homme et la matière pour créer, de sa main même et de son cerveau, un environnement propice - grâce à nos laboratoires et autres centres de recherche - à la conception et la mise au point de nouveaux procédés de fabrication à forte valeur ajoutée.

Comment ne pas penser à l'Institut Jean LAMOUR rendu possible par l'engagement et la détermination de son fondateur Jean-Marie DUBOIS dont le parcours scientifique et industriel hors pair en a fait l'homme de la situation pour mener à bien le lancement d'une réussite collective qui n'est pas pour rien dans l'inscription du Davos des Matériaux dans l'agenda mondial des grandes manifestations scientifiques - parrainé notamment par Philippe VARIN et Victoire de MARGERIE - et faisant de la Métropole du Grand Nancy un carrefour international dans le domaine des matériaux porté par quelques-unes des équipes les plus performantes au monde ?

Impossible également de ne pas citer à ce stade le rôle essentiel joué par le Pôle métropolitain européen du Sillon Lorrain dans le domaine des nouveaux matériaux, contribuant - dans le territoire même où la sidérurgie, les houillères et les mines ont longtemps contribué à la richesse économique ainsi qu'à notre fierté nationale -

à poser les jalons, notamment avec les labellisations LORnTECH et French Tech<sup>2</sup>, d'un nouvel écosystème privilégiant, dans un contexte favorable à la création et à l'émergence de start-up, une démarche innovante d'entrepreneuriat que l'on n'aurait pas encore cru possible il y a quelques années ?

En permettant ainsi de prendre date, pour favoriser l'entrée de notre territoire dans une nouvelle économie vertueuse privilégiant les matériaux du futur et la réalisation d'objets connectés qui peuvent véritablement - grâce à l'intelligence collective et un travail collaboratif encouragés - contribuer à accoucher d'une nouvelle société (on serait même tenté de parler de nouveau modèle ou de nouvelle civilisation), le Sillon Lorrain, grâce bien évidemment à des soutiens venus de l'Etat comme de la Région Grand Est - surtout à l'heure de l'élaboration du SRDEI<sup>3</sup> - mise clairement sur la carte de l'innovation et de la création dont chacun sait qu'elles sont les clefs des décisions d'investissement de demain.

**André Rossinot,**  
Président de la Métropole du Grand Nancy



- Directrice de la publication : **Dominique DUBAUX**
- Coordination : **Jean-Marie DUBOIS**
- Création graphique : **TAPAGE**  
www.mattioli-tapage.fr
- Crédit photos : **FOTOLIA**
- Contact : **ACADÉMIE LORRAINE DES SCIENCES**  
Métropole du Grand Nancy  
22-24 viaduc Kennedy - C.O. 36  
54035 Nancy Cedex  
als-contact@asso.univ-lorraine.fr
- Site : **als.univ-lorraine.fr**
- Tirage : 5000 exemplaires
- ISSN 2263-6129

<sup>1/</sup> ARTEM : Art, Technologie, Management. Projet emblématique de Nancy, conjuguant les talents et missions de trois écoles d'enseignement supérieur (Mines de Nancy, Institut Commercial de Nancy et Ecole Nationale Supérieure d'Art et de Design) sur un même site.  
<sup>2/</sup> <http://www.lornitech.eu/>  
<sup>3/</sup> SRDEI : Schéma Régional de Développement Economique, d'Innovation et d'Internationalisation.  
Voir : <http://www.alsacechampagneardennelorraine.eu/srdei/>

# “La science et l’ingénierie des matériaux : de l’histoire à la prospective”



**Yves Bréchet**

Haut Commissaire à l’Énergie Atomique, CEA, Saclay.

Membre senior de l’Institut Universitaire de France et professeur à Grenoble INP (où il enseigne toujours), Y. Bréchet occupe actuellement les fonctions de Haut Commissaire à l’Énergie Atomique. Il a auparavant exercé de nombreuses responsabilités de conseil ou d’administrateur dans l’industrie. Il est membre de l’Académie des Sciences de Paris, de l’Academia Europaea, de la European Academy of Sciences et membre d’honneur de l’ALS.

Les civilisations se sont développées à partir de besoins fondamentaux de l’homme : se nourrir, se protéger, se déplacer. Même si aucune civilisation n’est réductible à ces aspects matériels, remplir ces besoins élémentaires est nécessaire, ne serait-ce que pour assurer une forme de sécurité et de temps disponible indispensables pour développer d’autres aspects comme l’art ou la spiritualité. Comme la satisfaction de ces besoins implique une interaction avec l’environnement, elle suppose une maîtrise de la matière et de l’énergie.

Les matériaux sont de la matière remplissant une fonction. Les procédés sont des dispositifs qui utilisent l’énergie soit pour fabriquer des matériaux, soit pour produire du mouvement. La matière existe bien évidemment à l’état naturel (le bois, les pierres, les os, les peaux, certains métaux comme l’or ou le cuivre) (Figure 1) tout comme l’énergie (la force animale, une rivière qui coule, la foudre qui tombe, le vent qui souffle). À l’état naturel, la matière peut devenir « matériau » et remplir une fonction (un os peut servir d’arme), mais il est rare qu’elle puisse remplir cette fonction sous la forme sous laquelle on la trouve : il faut en général lui donner une forme (un silex doit être taillé en arêtes vives pour devenir une pointe de flèche). L’énergie à l’état naturel est rarement utilisable en l’état : il faut des dispositifs pour la transformer en mouvement (un soc et un harnais pour labourer avec un cheval, un moulin pour moudre le blé à l’aide du flot d’une rivière ou du vent). Le développement d’une civilisation matérielle est le processus qui rend progressivement l’être humain maître de son environnement, au lieu de le subir. Ce n’est pas par hasard que l’on parle de l’âge de pierre, de l’âge du bronze, de l’âge du fer, que l’on a souvent dit que le XIX<sup>ème</sup> était l’âge de l’acier, et le XX<sup>ème</sup> celui des polymères puis du silicium. C’est comme une reconnaissance de



Figure 1 : Cristaux de cuivre natif, matière minérale qui deviendra un matériau sous forme de tubes pour canalisation d’eau ou de fils électriques.

l’importance cruciale des matériaux. La science et l’ingénierie des matériaux sont ce qui rend possible cette maîtrise de notre environnement, c’est ce subtil mélange d’empirisme et de rationalisation, d’expérience et de découverte, d’expérimentation et de modélisation qui fait à la fois sa richesse, son charme et sa difficulté.

Ce magazine l’illustre par la variété des sujets couverts : la science des matériaux irrigue le domaine de l’énergie, de l’information, du bâtiment, du transport, de la santé. Les matériaux rendus accessibles à l’ingénieur couvrent toutes les variantes de la liaison chimique, les métaux, les céramiques, les polymères. Il est de plus en plus difficile de séparer les matériaux des procédés qui permettent de les obtenir, de les mettre en œuvre de telle sorte que la science et l’ingénierie des matériaux doit s’interpréter comme la compréhension et la maîtrise des matériaux et des procédés. (Figure 2)

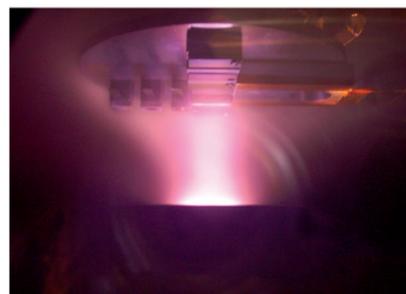


Figure 2 : Vue intérieure d’un réacteur à plasma froid, procédé utilisé pour activer des espèces chimiques qui se déposent en surface des matériaux pour former des films anticorrosion, antireflets, etc.

## UNE SCIENCE EN PLEIN RENOUVELLEMENT : DE L’EMPIRISME À L’EXPLORATION RAISONNÉE

Au cours des 70 dernières années, le savoir traditionnel, l’empirisme, ont progressivement laissé une place croissante à l’observation quantitative, la rationalisation des relations entre l’état de la matière et ses propriétés. La maturation a été lente, et la science des matériaux est une discipline relativement jeune, mais c’est une véritable « révolution » qui se poursuit aujourd’hui encore.

Les méthodes d’étude des matériaux ont été révolutionnées de fond en comble avec l’avènement tout d’abord de la métallurgie physique, puis de la science des matériaux. La dynamique de la discipline s’appuie sur le développement de méthodes expérimentales pour caractériser non seulement les microstructures, mais encore leur comportement « in operando ». Mais elle s’appuie aussi sur la compréhension des relations entre la microstructure et les propriétés. Les concepts développés pour la métallurgie (dislocation, thermodynamique des transformations de phase...) mais aussi ceux de la chimie des solides ou ceux de la physique des solides, ont permis de développer un corpus théorique, et plus récemment un ensemble d’outils numériques qui permettent de modéliser les relations entre procédés, microstructures et propriétés. (Figures 3) Comment ne pas penser à ce que disait Jean Perrin de l’atomisme : « expliquer du visible compliqué par de l’invisible simple » ? Ce n’est que dans les années 1930-1960 qu’on a compris le rôle essentiel des défauts dans les structures ordonnées et des configurations à l’échelle mésoscopique sur les propriétés des matériaux. Cette lente construction de concepts, de méthodes expérimentales, cette exploration méthodique de classes diverses de matériaux, depuis les plus familiers (les aciers, les bétons, les verres...) jusqu’aux plus exotiques (les quasicristaux, les cristaux liquides, les mousses...) ont permis dans un premier temps de donner un fondement aux

connaissances empiriques, dans une deuxième étape de fournir des outils de modélisation prédictive, et aujourd’hui de disposer de guides pour explorer les champs inconnus, pour faire des « matériaux sur mesure ». Cet outil s’est avéré d’une importance majeure pour développer de nouveaux alliages (« alloy design »), pour comprendre le comportement des matériaux hétérogènes (« micromécanique des composites »), pour rationaliser les procédés de consolidation des céramiques.

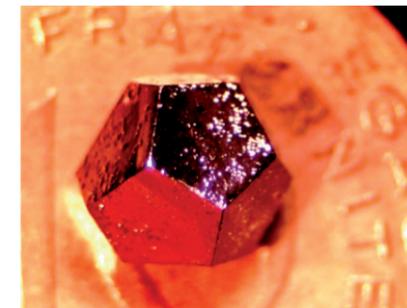
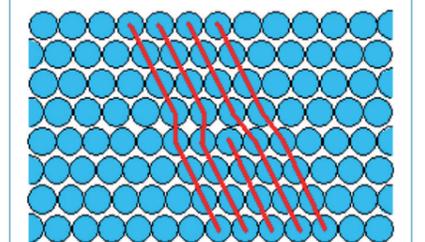
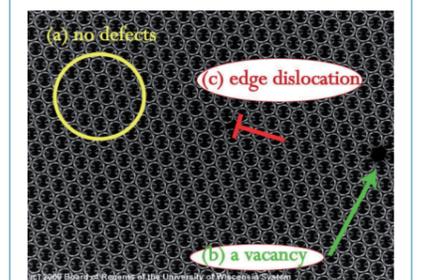
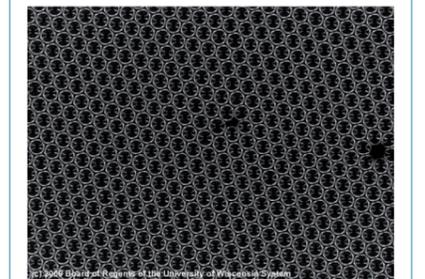
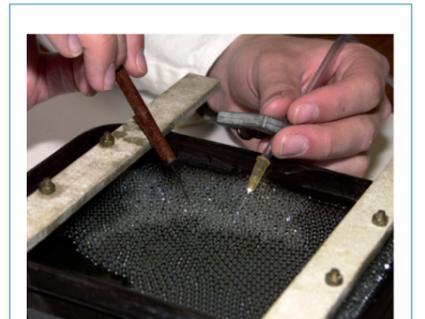


Figure 4 : Quasicristal Al-Pd-Mn placé sur une pièce de 10 centimes de francs pour donner l’échelle.

La science des matériaux telle qu’elle apparaît aujourd’hui, héritière de la métallurgie physique, fertilisée par l’idée du rôle central des défauts et le passage systématique par la microstructure, occupe une position intermédiaire entre les sciences fondamentales et les sciences appliquées. S’appuyant sur la physique, la chimie et la mécanique, elle n’est réductible à aucune de ces sciences de base. Nourrissant la conception, la mécanique des structures et la science des dispositifs, elle a sa dynamique propre qui ne saurait être réduite ni à ces disciplines mères, ni à ses multiples champs applicatifs.



Quartz - Mont Blanc (Crédit : B. Poty, ALS).



Figures 3 : Concept de dislocation étudié à deux dimensions dans un réseau de bulles de savon (Figures du haut) et schématisé (figure en bas de la colonne). Voir le chapitre qui suit.

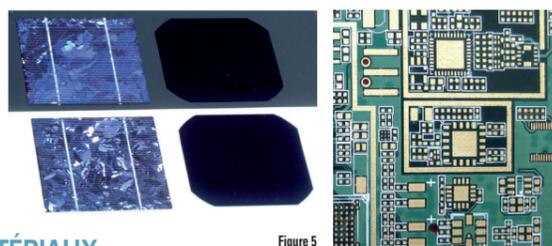


Figure 5

## DU MATÉRIAU RARE À L'HYPER-CHOIX DES MATÉRIEAUX.

Dans le même temps que naissait une science des matériaux, l'objet de son étude se modifiait lui-même profondément. Aux temps préhistoriques les seuls matériaux utilisés par nos ancêtres étaient les matériaux naturels, qu'ils soient minéraux ou organiques. Le choix des matériaux était essentiellement limité par leur proximité.

Un peu plus tard, disons autour de -50, la variété des matériaux disponibles avait considérablement augmenté. Les Romains avaient une excellente connaissance des céramiques, du verre, utilisaient la pierre mais aussi le mortier, et le travail des métaux, argent, or, étain, plomb, bronze et fer martelé, témoignait d'une bonne connaissance empirique de la métallurgie, moindre toutefois que celle rencontrée beaucoup plus tôt dans les civilisations extrême-orientales. Contrairement aux temps préhistoriques, les matériaux, et en particulier les matériaux métalliques, et même les poteries, voyagent sur de grandes distances (l'analyse des éléments traces dans les alliages est même une méthode d'étude des migrations de population). Entre l'empire romain et la fin du Moyen Âge, le monde des matériaux évolue relativement peu. Le dix-neuvième siècle est sans aucun doute le siècle des métaux, et en particulier des matériaux ferreux. Fontes et aciers permettent la construction de ponts, de navires, de trains, puis des voitures. La révolution industrielle est autant celle de l'acier que celle de la vapeur. Cette époque est celle de la production de masse, et du transport des matériaux sur le site de la mise en œuvre. Le vingtième siècle voit deux révolutions : les métaux et les céramiques régnaient en maîtres. Les polymères artificiels, fabriqués à partir du pétrole, font leur apparition, avec la fascinante variabilité de leurs propriétés, et la capacité de « construire » la matière au niveau atomique, en jouant sur l'arrangement des chaînes. La seconde révolution du vingtième siècle est l'apparition en force des matériaux fonctionnels, en beaucoup moins grande quantité, mais avec de très fortes valeurs ajoutées. La révolution de l'énergie électrique avait été rendue possible avec des matériaux déjà existants. La révolution de la micro-

électronique a nécessité la fabrication de silicium très pur, la révolution de la fibre optique n'aurait pas pu avoir lieu sans la capacité de disposer de verres de très haute pureté avec un gradient d'indice. Et alors que les applications fonctionnelles des matériaux concernaient de faibles tonnages, l'émergence de « l'internet des objets », le développement des énergies alternatives laisse prévoir des carences en terme d'approvisionnement et corrélativement des besoins accrus de recyclage, rendu difficile par leur dispersion. Au cours des siècles le lieu d'utilisation des matériaux s'est découpé du lieu de production, les familles de matériaux disponibles se sont considérablement enrichies, les exigences diversifiées ont conduit à une diversification de l'offre, l'émergence de nouveaux objets industriels et l'optimisation des matériaux sont de plus en plus fortement couplées.

Aujourd'hui, nous sommes confrontés à ce qu'on a pu appeler « l'hyper-choix des matériaux ». Le nombre de matériaux disponibles pour l'ingénieur est énorme. Les procédés pour les mettre en œuvre sont très variés, de nouvelles classes de matériaux, comme les mousses, sont entrées dans notre quotidien. On découvre tous les jours de nouveaux matériaux, mais un nombre limité d'entre eux quitte le laboratoire. Et malgré la variété des matériaux disponibles, dans chaque domaine applicatif, un nombre limité de familles sont dominantes : dans le bâtiment, les verres, les aciers et les bétons, dans l'automobile, les aciers, les alliages d'aluminium et les composites polymères, dans la microélectronique, le semi-conducteur largement dominant reste le silicium. (Figure 5)

Cette situation d'hyper-choix des matériaux a conduit à développer des bases de données et des outils de sélection qui n'en sont qu'à leurs débuts. Le problème de capture de l'expertise, la question de la maîtrise des procédés de plus en plus instrumentés conduira très probablement à des interactions accrues entre l'ingénierie des matériaux et des domaines tels que l'intelligence artificielle ou la gestion des « big data ».

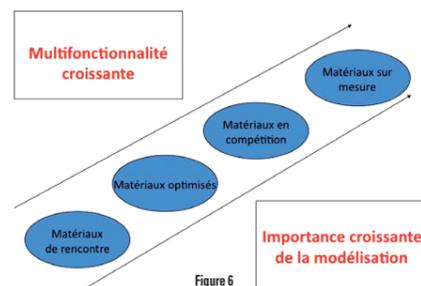


Figure 6

## VERS LA CONCEPTION DE MATÉRIEAUX SUR MESURE ET LA BIO-INSPIRATION

Au début, le matériau est à peine différent de la matière, c'est le « matériau de rencontre », celui que l'on ramasse comme on cueillerait un fruit.

C'est toujours la prééminence du matériau de rencontre que nous retrouvons jusqu'à la fin du Moyen Âge. Mais à force d'utiliser un matériau dont on a l'habitude, on s'efforce de l'améliorer, par essai ou erreur tout d'abord, puis progressivement en s'appuyant sur une compréhension approfondie de la cause microscopique des phénomènes. Cette démarche « d'optimisation des matériaux », dépassant la simple tradition, a été l'une des conséquences majeures de l'émergence de la science des matériaux.

La variété des matériaux augmentant, les exigences sur les matériaux devenant de plus en plus drastiques, les différentes solutions entrent en compétition : le tropisme du « matériau de rencontre » est oublié, mais même le matériau « dont on a l'habitude », le matériau que l'on croit optimisé, est menacé dans ses domaines de prédilection. C'est le pendant de l'hyper-choix des matériaux, la compétition féroce pour remplir les cahiers des charges. Cette compétition conduit à une évolution de la relation au matériau : on doit intégrer dans la réflexion non seulement les propriétés, mais les conditions de mise en œuvre, et de ce rapprochement entre la science des matériaux et la conception naît un nouveau regard sur les matériaux : ce n'est plus simplement le matériau optimisé, c'est le « matériau sélectionné » qui devient la norme. (Figure 6)

Enfin la dernière étape, celle dans laquelle nous entrons aujourd'hui, est la plus éloignée du « matériau de rencontre », c'est le « matériau sur mesure », celui qui n'existe que par le carnet des charges qui l'exige, celui qui combine des propriétés contradictoires qu'aucun matériau « normal » ne devrait présenter. Et pour développer



Figure 7: Tubulure d'échappement de moteur automobile obtenue en une seule opération par un procédé de fabrication additive associant un polymère à une poudre quasicristalline utilisée comme renfort mécanique.

ce matériau sur mesure, l'ingénieur fait feu de tout bois : jouant sur la microstructure au niveau sub-micrométrique, il développera des gradients de microstructures sur des échelles comparables à celle de la pièce. S'inspirant des approches de la mécanique des structures, il développera des géométries de répartition de la matière à des échelles millimétriques. Associant des propriétés structurales et des propriétés fonctionnelles, il mariera des matériaux de nature, de familles différentes (Figure 7). La dichotomie entre matériau et dispositif s'estompe, la distinction entre matériaux fonctionnels et matériaux de structure devient floue. Il développera des mousses, des tissus, des treillis, et comme les degrés de liberté ainsi offerts sont virtuellement infinis, il devra concevoir le « multi-matériau architecturé » par le calcul avant de le réaliser, pour identifier a priori les solutions prometteuses. Cette évolution vers le matériau « sur mesure » a pour force motrice la multifonctionnalité croissante des cahiers des charges. Elle a pour guide la modélisation multi-échelle et multi-physique. Elle nous éloigne plus encore des matériaux que nous donnait la nature, mais par un étrange paradoxe, elle nous y ramène aussi. En redécouvrant l'architecture des matériaux comme une variable d'optimisation, l'ingénieur redécouvre le secret de la variété des matériaux naturels. Le graal ultime serait de pouvoir s'inspirer de la nature non pas simplement pour développer des matériaux multifonctionnels performants, mais encore pour mettre en œuvre des mécanismes de guérison « in operando » qui assureraient aux matériaux une plus grande durabilité.

## LES MATÉRIEAUX DEMEURENT UN ÉLÉMENT ESSENTIEL D'UNE CIVILISATION INDUSTRIELLE : APPRENDRE À GÉRER LA RARETÉ

Au cours des siècles l'ensemble des matériaux s'est enrichi, l'utilisation des matériaux a varié, mais les matériaux n'ont pas disparu. On a souvent parlé, avec beaucoup de légèreté, d'une dématérialisation de l'économie.

Faute d'avoir gardé à l'esprit cette évidence qu'il faut des matériaux pour réaliser des voitures, des matériaux pour fabriquer des ordinateurs, des matériaux pour faire les trains et les avions, on peut dire de considérables sottises sur la dématérialisation de l'économie. La récente fascination pour l'économie numérique ne doit pas nous faire oublier que les matériaux sont indispensables pour la mettre en œuvre, et qu'inversement, les évolutions scientifiques du côté du numérique auront un impact probablement majeur, sinon sur la science des matériaux, au moins sur son ingénierie.

Les matériaux demeurent un atout stratégique incontournable, ou une source de faiblesse inquiétante de nos économies. Il semble à peu près incroyable que l'Europe ait laissé à ce point se dégrader ses capacités de fabriquer et de mettre en œuvre les alliages métalliques. Il est tout aussi inquiétant que les grandes fonderies pour la microélectronique soient positionnées en Chine et aux États Unis, quand ces technologies sont cruciales pour notre défense et notre industrie aéronautique..., domaines où la Chine et les USA sont des concurrents sans pitié.

Les matériaux vont devenir une denrée rare et précieuse. Les besoins quantitatifs sont croissants, simplement liés au développement de pays à démographie très dynamique. Les ressources sont limitées, ou tout le moins, les coûts de ces ressources vont augmenter considérablement. De nouvelles exigences sociétales se font jour, aussi bien du point de vue de la production, du transport, du stockage de l'énergie, du point de vue de l'impact environnemental, du point de vue de la santé publique. Des problèmes géopolitiques majeurs comme celui de l'eau vont conduire à une pression accrue sur les matériaux indispensables aux usines de dessalement, à des besoins énergétiques considérables. Loin de diminuer, la demande sur les matériaux ira croissant.

Toute notre civilisation industrielle puise dans les réserves naturelles pour créer des objets. Dans les sociétés d'abondance, la fin de vie de l'objet est l'obsolescence. Dans les sociétés moins riches, la vie de l'objet est prolongée par des étapes de réparation. Quel sera le sort des sociétés en manque de matériaux ?



Nous utilisons aujourd'hui des matériaux disponibles dans la nature, les matériaux naturels (plus ou moins renouvelables, pourvu que la consommation n'entame pas le stock), ou les matériaux « minéraux » qui ne se renouvellent pas sauf en des temps géologiques. De cette dépendance totale vis-à-vis des ressources naturelles, nous avons appris à extraire de la matière naturelle les matériaux utiles, en puisant dans les réserves. Est-il réaliste de poursuivre à ce rythme un développement qui conduit à une demande aussi pressante en termes de matériaux ? Il est évident que ce n'est possible qu'en repensant la notion de réserve : la nature n'est pas notre seule réserve. La notion de réserve est hautement subjective, elle dépend du coût que l'on est disposé à payer pour une ressource. Mais la matière utilisée dans les matériaux mis en œuvre dans les produits industriels, est elle-même une réserve, que la fin de vie de l'objet n'est pas son obsolescence, ni même son obsolescence retardée par la réparation, mais que sa fin de vie est le renouvellement des réserves, le retour de l'objet vers le statut de « matériau ». C'est sans doute le nouveau défi que devra relever cette ingénierie, mais reste à trouver un modèle économique qui rende viable cette exigence de bon sens.

1/ (Crédit : Wikipedia et Musée minéralogique Seaman (Université technologique du Michigan, Houghton, Michigan, USA).  
2/ (Crédit : G. Henrion, IJL, Nancy)  
3/ (2009 Board of Regents of the University of Wisconsin System)  
4/ (Crédit : P.A. Thiel, Ames Laboratories, USA).  
5/ (Crédit : IJL, Nancy et Ateliers Cini, Tomblaine).

# Les matériaux métalliques et leurs procédés



**François Mudry**  
Président de l'IRT-M2P  
et de Metafensch

Ancien directeur scientifique d'Arcelor Mittal, ancien directeur des recherches de l'Ecole des Mines de Paris, est actuellement Président de l'IRT-M2P de Metz et de Metafensch à Thionville.

## QU'EST-CE QU'UN MATÉRIAU MÉTALLIQUE ?

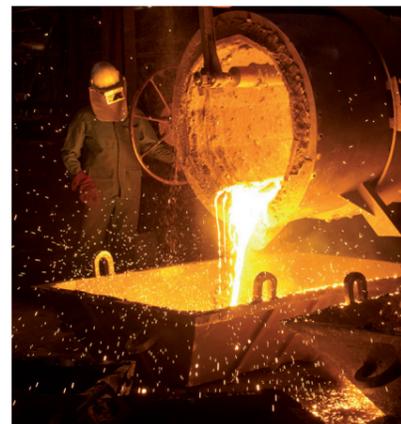
Les métaux sont parmi les premiers matériaux utilisés par l'homme. Leur présence est d'ailleurs un marqueur pour dater la fin de l'âge de pierre. L'humanité a ensuite connu l'âge du cuivre, celui du bronze et enfin celui du fer. Bien entendu, depuis la révolution industrielle, nous disposons aujourd'hui, en grandes quantités, d'une multitude de matériaux. Les métaux conservent néanmoins une place importante en volume et en masse malgré le développement massif des matériaux polymères.

Un métal se caractérise par la liaison métallique entre ses atomes constituants. Les atomes sont assemblés en réseau régulier et mettent en commun certains électrons de leur couche externe. Il se constitue ainsi un nuage électronique où les électrons peuvent se déplacer relativement librement d'un atome à l'autre. Ils se meuvent presque librement dans un potentiel électrostatique résultant de l'attraction due aux atomes régulièrement espacés et de la répulsion due aux autres électrons<sup>1</sup>.

Au sens strict, un métal est un des 92<sup>e</sup> éléments simples de la table de Mendeleïev. Celle-ci contient 6 métalloïdes aux propriétés semi-conductrices (Si, Ge, etc.), 17 non-métaux présents dans les polymères (C, N, O, H, etc..) et donc, 69 métaux dits *purs* qui forment la vaste majorité des éléments naturels. Parmi eux, des éléments de transition de la quatrième ligne du tableau sont les plus courants : Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn. Il faut y ajouter l'aluminium et le magnésium de la troisième ligne ainsi que peut-être l'or, l'argent, l'étain et le plomb au-delà. En fait aujourd'hui, presque tous les éléments métalliques du tableau sont utilisés dans une application ou une autre. Chacun de ces métaux, à l'état solide, se dispose en un réseau tridimensionnel dense, défini par sa *maille élémentaire* qui se reproduit à l'infini<sup>2</sup>. Si nous prenons le cas du fer, on le trouve sous la forme *cubique centrée* : un atome aux 8 coins

d'un cube et un au centre du cube, ou sous la forme *cubique face centrée* avec un atome aux 8 coins du cube et un au milieu de chacune des 6 faces. Ces deux mailles élémentaires sont, avec la maille hexagonale compacte, les plus fréquentes. Les métaux peuvent passer d'une forme à l'autre en fonction de la température, de la pression ou de la présence de tel ou tel atome étranger en quantité suffisante. On dit qu'il y a un changement de phase.

Tous les métaux rencontrés dans la vie courante ne sont pas des métaux purs mais des mélanges d'atomes dans une *matrice* d'accueil constituée du réseau d'atomes d'un métal *pur*. Par exemple, l'acier est essentiellement constitué d'atomes de fer rangés en réseau cubique centré avec des atomes de carbone *coincés* entre ces derniers<sup>4</sup>. Le bronze, inventé par nos lointains ancêtres, *l'airain cruel* des grecs, est une matrice de cuivre avec 3% à 20% d'étain<sup>5</sup>. Ces mélanges sont appelés des alliages<sup>6</sup>. Lorsqu'on mélange ainsi divers corps purs, apparaissent des phases, c'est-à-dire des composés correspondant à un arrangement particulier des atomes. Chacun connaît le cas particulier du sel NaCl avec les atomes de sodium et de chlore répartis régulièrement : un sodium, un chlore occupant chacun les sommets d'un cube simple. Il y a ainsi des multitudes de phases dans les métaux. Elles ont des propriétés différentes de celles de la matrice qui les entoure.



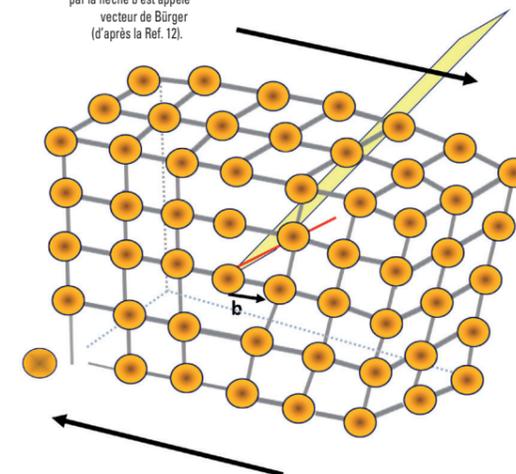
## LEURS PROPRIÉTÉS

Les métaux ont des propriétés intrinsèques intéressantes. Les électrons de la bande de conduction<sup>8</sup> les rendent bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité et leur confèrent un aspect brillant apprécié. En particulier, le cuivre et l'aluminium sont utilisés pour transporter le courant électrique. Pour cette application, il faut éviter au maximum tout atome étranger ou tout défaut à l'échelle atomique qui perturberait l'écoulement des électrons. On recherchera donc la pureté.

Beaucoup de métaux de transition (notamment : Fe, Co, Ni mais aussi des terres rares comme Néodyme, Samarium, etc..) ont, en outre, des propriétés magnétiques qui sont associées à la structure électronique de leur atome<sup>9</sup>. Des phases intermétalliques comme le célèbre FeNdB ont connu un important développement pour leur très fort magnétisme à des coûts acceptables. La même famille a des propriétés intéressantes en matière de dilatation. En particulier le fameux Invar (Ni 36%, Fe 64%)<sup>10</sup> dont le coefficient de dilatation est quasi nul.

Les métaux sont surtout connus pour leurs propriétés mécaniques alliant une grande dureté à une bonne malléabilité. Intrinsèquement, un métal est dur, élastique et cassant. A l'échelle atomique, les atomes sont liés de façon forte : les éloigner ou les rapprocher demande des efforts considérables. On appelle contrainte l'effort (en N) par unité de surface (en m<sup>2</sup>) qui s'exprime en Pascals (Pa). La contrainte théorique de rupture serait de l'ordre d'une fraction du module d'Young<sup>11</sup> (paramètre reliant l'allongement élastique et réversible d'un matériau sous un effort faible donné) : c'est énorme, 3 à 4 x 10<sup>9</sup>Pa pour un acier. Les aciers les plus résistants arrivent difficilement à la moitié. Le fer pur se déforme et rompt pour des contraintes 50 à 100 fois plus faibles. Ceci provient de la présence de défauts à l'échelle microscopique dans l'alignement des atomes. En particulier, des défauts linéaires appelés *dislocations*<sup>12</sup> jouent un rôle majeur.

Figure 1 : Schéma d'une dislocation. Le demi-plan jaune est en plus. La ligne rouge (par forçement droite) qui le limite est appelée ligne de dislocation. Le saut de un atome marqué par la flèche b est appelé vecteur de Burger (d'après la Ref. 12).



Imaginons un empilement régulier d'atomes aux coins d'un cube (voir figure 1). Introduisons par le haut un plan d'atomes non complet à l'intérieur de ce bel empilement. Dans le plan introduit, les atomes sont régulièrement répartis en carrés jusqu'à ce qu'on arrive à la limite du plan incomplet. Cette limite est matérialisée par une ligne, pas forcément droite. Les atomes de chaque côté de ce plan vont devoir s'écarter de part et d'autre de ce plan. Les atomes du plan vont alors se positionner en face des atomes de l'empilement initial car c'est énergétiquement favorable de reconstituer un empilement localement régulier. On sent bien qu'au voisinage de la limite, le bel empilement sera perturbé : au-dessus en tassant les atomes et en-dessous, en les écartant. La limite d'un tel plan est appelée *ligne de dislocation*<sup>13</sup>. Elle a la propriété de se déplacer. En effet, imprimons un effort de cisaillement perpendiculaire au plan supplémentaire, vers sa droite en haut et vers sa gauche en bas. Un mouvement favorable des atomes consiste à déplacer légèrement vers la gauche les atomes en dessous de la dislocation et vers la droite au-dessus. Cela revient à reconstituer complètement le plan incomplet en le déplaçant vers la droite d'une distance interatomique. En renouvelant l'opération, la ligne de dislocation glisse de proche en proche, jusqu'à atteindre les limites du cristal. C'est ainsi qu'un métal peut être déformé pour des contraintes bien plus faibles que celle indiquée plus haut. Cette déformation se fait surtout par cisaillement, à des contraintes faibles dépendant très fortement de la température. Au total, un métal se déforme de façon irréversible grâce au déplacement de ces dislocations et finit par rompre sous une contrainte modérée après un allongement important.

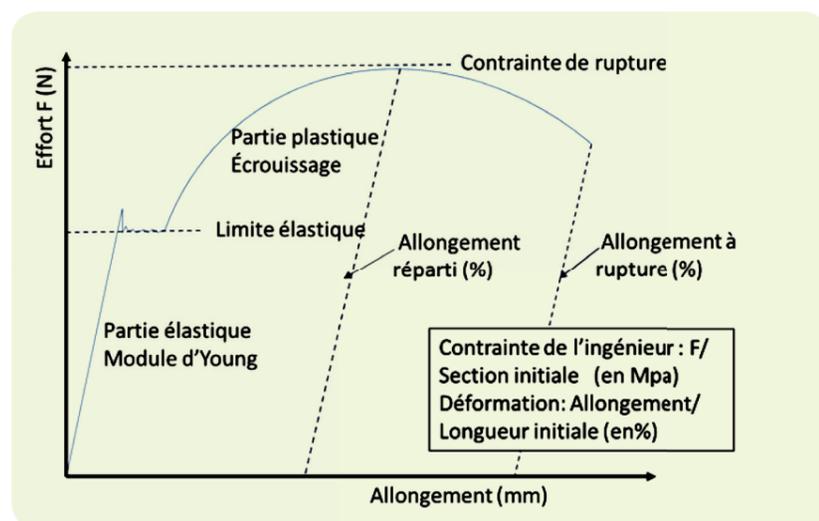


Figure 2 : Courbe de traction typique avec palier après la partie élastique de la déformation (d'après la Ref.14).

Typiquement, sous une contrainte de traction croissante<sup>14</sup> (Figure 2), un barreau de métal s'allonge d'abord de façon réversible jusqu'à environ 0,2% de sa longueur initiale (on parle d'une *déformation* de 0,2%). Lorsqu'on ramène la contrainte à zéro, le métal reprend sa place initiale. La déformation est linéaire en fonction de la contrainte appliquée. Au-delà, le métal s'allonge de façon irréversible : les dislocations ont commencé à bouger de façon massive. On appelle limite d'élasticité la contrainte à partir de laquelle se déclenche ce phénomène. La déformation se poursuit pendant que l'effort continue à croître, rétrécissant la section du barreau. La force globale passe alors par un maximum. La contrainte à ce moment est appelée résistance du matériau. Si on veut augmenter l'effort, il y aura rupture. Cependant, on peut continuer à déformer le barreau en acceptant de baisser l'effort. Cela se poursuit jusqu'à une déformation maximale conduisant à la rupture. Cette déformation à rupture mesure la *ductilité* du matériau. Cette dernière varie énormément suivant le type de déformation imposée : en traction, en compression, en cisaillement, etc.

Nous venons d'introduire une grande quantité de propriétés importantes dans la pratique : la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, la ductilité. Tout cela varie énormément avec la température. Le meilleur compromis dépendra beaucoup de ce qu'on souhaite faire subir au métal et à quelle température tout au long de sa vie : pendant sa mise en forme et pendant son utilisation. Dans la plupart des cas, la résistance augmente lorsque

la température diminue. Par contre, la déformation à rupture diminue fortement. Or, pour la plupart des applications, il faut absolument qu'une certaine déformation minimale soit possible en service sous peine de casser de façon catastrophique<sup>15</sup>. C'est pourquoi, on a défini des essais particuliers dits de *résilience* garantissant qu'à la température d'utilisation, le matériau a encore la capacité de se déformer et d'éviter ainsi une rupture brutale. Il s'agit d'une propriété proche de la ductilité mais néanmoins différente. En général, la résistance et la ductilité (ou la résilience) sont des propriétés antagonistes. Lorsqu'on améliore l'une, on détériore l'autre. La figure 3 donne, par exemple, la courbe dite *en banane* donnant les différents aciers pour application automobile dans un diagramme reliant leur ductilité à leur résistance.

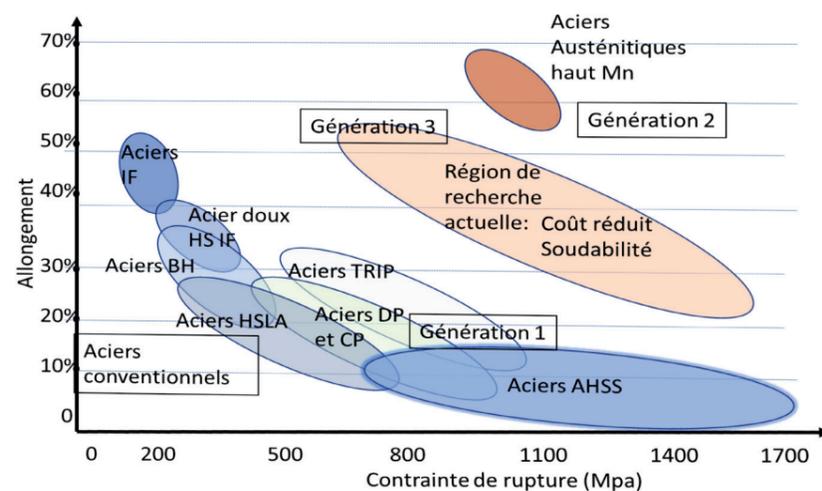


Figure 3 : Répartition des aciers actuels sur une courbe dite *en banane* : allongement versus contrainte à la rupture.

La limite élastique est le paramètre principal pour dimensionner les structures. On a donc essayé de l'augmenter par divers moyens. Dans tous les cas, on cherche à bloquer le déplacement des dislocations mais pas trop sous peine de ductilité ou de résilience désastreuse. On peut utiliser des éléments d'alliage qui durcissent le matériau, des précipités très fins (de taille nanométrique), etc. Un moyen particulièrement efficace est de diminuer la taille des unités cristallines<sup>16</sup>. En effet, les métaux sont constitués de multiples cristaux du métal de base dont les orientations sont différentes. Chaque cristal est appelé "*grain*" et entre chacun d'eux existe une interface plus ou moins plane appelée joint de grain qui bloque les dislocations. C'est pourquoi on recherche généralement des grains fins ; cependant, c'est le contraire qui est recherché à haute température car la rupture intervient dans les joints. Pour ce cas, on a cherché à faire des pièces composées d'un seul cristal.

Les métaux ont donc des propriétés électroniques, magnétiques et mécaniques intéressantes. En revanche, ils sont en général très denses et pèsent donc lourd pour les applications où le gain de poids est important (aéronautique, automobile, etc.). La densité<sup>17</sup> est liée à l'arrangement atomique. Il est impossible de la modifier sauf à introduire des atomes étrangers plus légers. C'est par exemple le cas des alliages Aluminium-Lithium<sup>18</sup> qui permettent un allègement significatif des structures d'avions.



L'autre difficulté est la corrosion<sup>19</sup>. Tous les métaux forment en effet facilement des oxydes (sauf les métaux *nobles* ou *précieux* : Or, Argent, Platine, etc.). Il s'agit d'éviter cette évolution en service en présence d'oxygène. Pour cela, on dépose des revêtements protecteurs. Ce peut d'ailleurs être la couche d'oxyde elle-même comme pour l'aluminium ou le titane. Pour l'acier, on dépose des couches de zinc ou de chrome. La résistance à la corrosion est un problème difficile car dépendant d'une multitude de paramètres : microstructures, température, nature de l'atmosphère corrosive, mode de chargement, etc. On voit donc que le développement d'un alliage doit répondre à de nombreuses contraintes pour répondre aux besoins d'une application donnée. Bien évidemment, il faut également rentrer dans des limites économiques acceptables et répondre à la demande de la société en termes d'impact sur l'environnement et la santé. Cela conduit à définir des alliages et des revêtements de plus en plus sophistiqués qui doivent néanmoins être produits industriellement à des coûts acceptables : impossible de définir un matériau sans préciser les procédés pour l'obtenir !

## LES PROCÉDÉS

Deux sources existent aujourd'hui pour produire les matériaux métalliques : les minerais et le recyclage. La disponibilité des matières premières est très variable suivant le métal considéré. De nombreuses études technico-économiques ont analysé la situation des différents minerais nécessaires pour notre société moderne qui s'étend petit à petit à toute la planète. C'est ainsi que des métaux courants comme le fer ou l'aluminium ne posent pas de gros problèmes d'approvisionnement sur le long terme. Tout au plus, les très bons gisements s'épuisent et la qualité moyenne se dégrade. Le caractère spéculatif du marché mondial conduit à de brusques variations des cours, difficiles à gérer pour les industriels.



C'est le cas pour le prix du nickel qui a été multiplié puis divisé par 3 sur quelques années. D'autres métaux sont considérés comme stratégiques<sup>20</sup> car peu disponibles ou soumis à des aléas politiques importants. On peut citer le lithium qui entre dans la composition des nouvelles batteries, le néodyme (dont nous avons parlé plus haut pour le magnétisme), le niobium qui est en situation monopolistique, etc.<sup>21</sup>



Le recyclage est utilisé depuis très longtemps pour la plupart des métaux, particulièrement pour ceux qui ont une valeur intrinsèque importante. C'est le cas de l'or et de l'argent, bien sûr, mais aussi du cuivre ou du nickel par exemple. D'autres métaux de grande diffusion sont aussi recyclés dans de grandes proportions comme le fer ou l'aluminium. Compte-tenu de l'appauvrissement des gisements et de l'énergie importante pour produire du métal vierge à partir de minerai, cette voie devrait être privilégiée à terme. Cependant, tant que notre économie mondiale est en croissance, notamment dans des pays comme la Chine, l'Inde ou le Brésil, la consommation de métaux l'est également. Or il y a un laps de temps qui peut être important entre la production d'un bien et son retour dans la boucle de recyclage. Ceci fait que la quantité recyclable est liée à la production d'il y a quelques années (15 ans environ pour l'acier) et non à la production actuelle qui peut être beaucoup plus élevée. Ceci explique que le taux de recyclage d'un métal peut être élevé, par exemple près de 80% pour l'acier, mais que la part produite aujourd'hui par la voie

du recyclage soit nettement plus faible (autour de 45% pour l'acier). A terme, la croissance mondiale s'appuiera de moins en moins sur les matériaux et la consommation mondiale va se stabiliser. La production pourrait alors, théoriquement, se faire beaucoup plus par la voie du recyclage jusqu'à un pourcentage proche de celui du taux de recyclage effectif. *De facto*, des contraintes au niveau des possibilités de tri des matières et de l'exigence sur la qualité chimique des matières à utiliser pour la fabrication vont empêcher d'atteindre ce niveau<sup>22</sup>. La production à partir des minerais dépend évidemment de leur composition chimique. Les minerais sont souvent des oxydes, des sulfures ou des chlorures ; plus rarement un autre élément non métallique. Ceci se fait par réduction en utilisant du carbone (c'est le cas du fer, du silicium, etc.) ou d'autres réducteurs. Ainsi, pour le titane, on commence par substituer le chlore à l'oxygène en présence de carbone puis le magnésium comme réducteur du chlorure formé. Pour des métaux non réductibles facilement, on utilise l'électrolyse comme c'est le cas pour l'aluminium ou le magnésium. L'opération de réduction donne en général un métal qui contient encore des proportions de l'élément réducteur qui doit être éliminé par une oxydation sélective. Le tout se passe en général dans des outils de grande taille et à haute température. La consommation énergétique est importante et l'oxydation du carbone donne bien évidemment des oxydes de carbone. Dans le cas du fer, le minerai est enfourné avec du charbon traité sous forme de coke dans un haut-fourneau. De l'air est soufflé en bas de l'appareil. L'oxygène réagit avec le carbone du coke pour former du monoxyde de carbone gazeux. Ce dernier vient réduire l'oxyde de fer contenu dans les minerais. Ceci produit des oxydes de carbone qui s'échappent en haut de l'appareil. Le fer liquide, mélangé avec du carbone est extrait en bas de l'appareil : la fonte. Le carbone excédentaire est ensuite éliminé en soufflant de l'oxygène dans une cornue appelée convertisseur pour donner de l'acier.



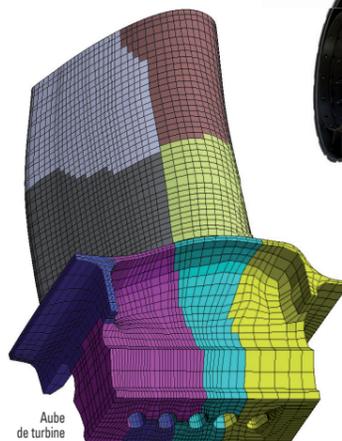
Dans le cas de l'aluminium<sup>23</sup>, le minerai de bauxite est préparé puis dissous. On y ajoute des fondants pour former un liquide vers 960°C dans lequel on fait passer de forts courants électriques avec production d'aluminium sur la cathode.

La production à partir de métal recyclé se fait dans des fours qui refondent la matière et tentent, par des ajouts habiles, de retirer les éléments indésirables mélangés dans les matières enfournées. La consommation énergétique est nettement moindre que précédemment mais la qualité métallurgique également.

Des opérations d'addition et de traitement du métal en phase liquide permettent ensuite d'obtenir la composition visée et d'améliorer la pureté chimique du mélange.

Le métal liquide est ensuite coulé et solidifié dans des moules par divers procédés qui donnent, en général une préforme<sup>24</sup>. La microstructure résultant de la solidification est difficile à maîtriser. En conséquence, les pièces brutes de solidification nécessitent des traitements thermomécaniques ultérieurs. Cependant, la fonderie<sup>25</sup> est un procédé qui s'améliore régulièrement pour maîtriser simultanément la forme et la microstructure. On peut citer les très beaux développements de l'industrie aéronautique pour obtenir par fonderie les aubes monocristallines en alliage base nickel. Une technique plus récente est l'obtention de poudres métalliques en soufflant vigoureusement un gaz ou un liquide froid sur un jet de métal liquide qui éclate alors en gouttelettes. La poudre peut être utilisée pour certaines techniques de fabrication additive<sup>26</sup>, qui sont en plein développement.

Dans la voie classique, la préforme obtenue après solidification est ensuite mise en forme à chaud, ce qui nécessite de la réchauffer avant de la déformer pour lui donner la forme souhaitée à une température où le métal est ductile. La microstructure évolue alors beaucoup<sup>27</sup>.

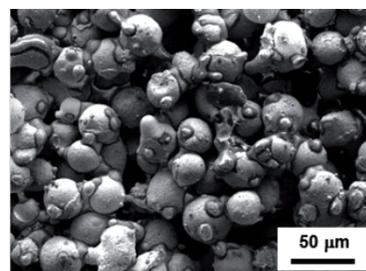


Aube de turbine

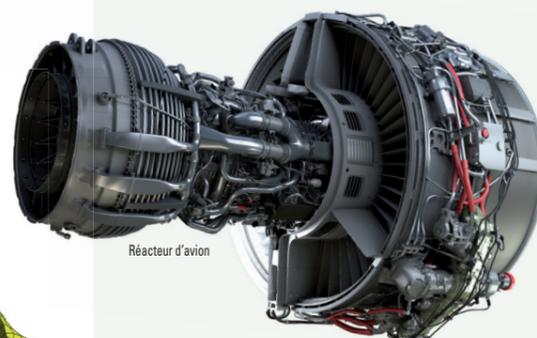


Très souvent, on poursuit par une déformation à froid, dans la mesure où la ductilité du métal à basse température le permet, afin d'obtenir une forme finale précise<sup>28</sup>.

Pour bénéficier des propriétés de résistance à la corrosion ou au frottement, on ajoute un traitement de surface<sup>29</sup> : on modifie localement la microstructure ou on dépose un autre matériau qui apporte la propriété souhaitée. La maîtrise des propriétés finales dépend évidemment de chacune de ces étapes qu'il faut donc contrôler de bout en bout pour les applications un peu compliquées, qui sont finalement celles qui restent dans nos pays plus développés où les usines ont été investies il y a longtemps, les coûts de personnel relativement élevés et les approvisionnements complexes.



Poudre atomisée



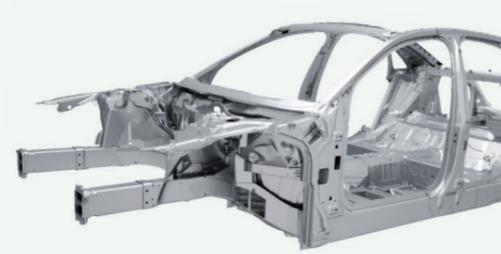
Réacteur d'avion

## QUELQUES DÉVELOPPEMENTS ACTUELS EN LORRAINE

Citons quelques exemples de développements effectués plus particulièrement en Lorraine pour répondre aux défis de l'industrie moderne.

L'alliage TiAl a été développé pour la sortie de la partie chaude des réacteurs d'avion afin d'augmenter de quelques degrés la température de fonctionnement tout en diminuant la densité du matériau. Ceci améliore notablement le rendement du réacteur. Cet alliage est tout à fait particulier car constitué d'une phase Titane-Aluminium résistante à haute température. En revanche, elle est particulièrement difficile à travailler à presque toutes les étapes des procédés. Nos laboratoires lorrains ont travaillé sur les propriétés du matériau en particulier pour la corrosion, sur les procédés d'élaboration du métal liquide extraordinairement sensible à toute trace d'oxygène ou d'azote, sur sa transformation à chaud ainsi que sur les moyens de recycler les chutes de fabrication. Cet alliage est utilisé dans le nouveau moteur LEAP de Safran<sup>30</sup>. Les équipements industriels de production ne sont pas en Lorraine.

L'allègement est également un objectif important dans l'automobile. Les sidérurgistes ont cherché à diminuer les épaisseurs pour alléger les pièces. C'est un travail consistant en une analyse pièce par pièce de ce qui serait possible en optimisant les propriétés des matériaux, notamment le compromis *résistance/ductilité* : on peut, évidemment, diminuer les épaisseurs en augmentant la résistance mais il faut que la pièce reste formable, soudable, etc. Le centre de recherche de Maizières-lès-Metz est à la pointe de cette recherche en collaboration étroite avec les constructeurs automobile et les laboratoires académiques de la région (et d'ailleurs). Deux voies métallurgiques sont utilisées : faire l'emboutissage des pièces à chaud ce qui permet d'accepter des ductilités moindres à froid mais nécessite une modification importante chez les fabricants d'automobiles. La métallurgie, qui impose



de plus fortes concentrations en manganèse, est relativement facile à obtenir mais le revêtement anticorrosion doit être complètement repensé. L'autre voie est de rechercher un compromis résistance-ductilité qui sorte de la courbe *en banane*. Actuellement, on s'oriente vers des aciers à manganèse moyen qui nécessitent des traitements thermiques très fins. Du point de vue de la production industrielle, l'usine Avale de Florange s'est spécialisée dans les aciers de la première voie avec les investissements nécessaires sur les équipements<sup>31</sup>.

Un autre cas d'équipement spécifique en Lorraine est celui du laminage de rails de grandes longueurs à Hayange. La principale difficulté est la maîtrise du traitement thermique donnant sa dureté au rail. Il se fait par aspersion d'eau. Un défaut d'homogénéité courbe légèrement le rail. Au bout de 120 m, il peut finir dans le toit de l'atelier<sup>32</sup> !

Autre équipement original : la production de tuyaux en fonte à Pont-à-Mousson. La maîtrise de la solidification dans le procédé de centrifugation et des revêtements est également difficile<sup>33</sup>.

Si on s'éloigne de la métallurgie des alliages du fer, il y a également en région *Nimesis Technology*, une start-up de l'université de Lorraine spécialisée dans les alliages dits à mémoire de forme. Ce sont des alliages compliqués avec des éléments comme le chrome, le nickel, l'aluminium, etc. Ils ont la propriété d'adopter des formes différentes suivant la température grâce à une transformation de phase au *bon endroit*<sup>34</sup>.

On pourrait donner d'autres exemples où la recherche en région est fortement impliquée : l'amélioration des alliages base-nickel pour l'aéronautique, le développement des alliages base-fer pour la mise en forme à l'état semi-solide (ou thixo-forgeage), la diminution d'épaisseur des tôles d'acier pour boîtes boisson laminées à Florange ; les alliages électriques, magnétiques ou thermoélectriques réalisés couche atomique par couche atomique, etc.

## CONCLUSION

Que conclure ? Les métaux ont plusieurs millénaires d'existence et ont influencé fortement l'histoire humaine, notamment en Lorraine pour la métallurgie du fer. Nos sociétés modernes ont saturé leur consommation des alliages courants à un niveau relativement stabilisé. En revanche, l'évolution de la technologie demande des propriétés toujours plus pointues, ce qui induit des recherches complexes pour répondre aux besoins, suivies par des investissements industriels pour produire les alliages nécessaires dans de bonnes conditions. Les exemples donnés montrent que ce n'est pas une vue de l'esprit. Il y a bel et bien des développements importants. Une autre tendance des pays développés sera l'utilisation massive des matières recyclées. Là aussi, cela amène à des restructurations industrielles car les outils nécessaires ne sont pas les mêmes. Cependant, le futur est là : des alliages sophistiqués obtenus à partir de produits recyclés.

Enfin, d'autres évolutions technologiques sont devant nous et la région est bien équipée pour y répondre : la fabrication additive et, plus généralement, la métallurgie des poudres, les traitements de surface par voie physique, les dépôts de couches fines sous atmosphère contrôlée, le développement de nanomatériaux métalliques et enfin, le développement des nanomatériaux couche atomique par couche atomique.



- 1/ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison\\_métallique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_métallique)
- 2/ En s'arrêtant conventionnellement à l'Uranium.
- 3/ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Maille\\_\(cristallographie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Maille_(cristallographie)) ; [https://fr.wikipedia.org/wiki/Cubique\\_centré](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cubique_centré) ; [https://fr.wikipedia.org/wiki/Cubique\\_à\\_faces\\_centrées](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cubique_à_faces_centrées)
- 4/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/acier>
- 5/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bronze>
- 6/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage>
- 7/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Martensite>
- 8/ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Théorie\\_des\\_bandes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Théorie_des_bandes)
- 9/ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Aimant\\_permanent](https://fr.wikipedia.org/wiki/Aimant_permanent)
- 10/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Invar>
- 11/ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Module\\_de\\_Young](https://fr.wikipedia.org/wiki/Module_de_Young)
- 12/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Dislocation>
- 13/ En l'occurrence une dislocation coin. Il existe un autre type de dislocation appelée dislocation vis.
- 14/ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai\\_de\\_traction](https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai_de_traction)
- 15/ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mécanique\\_de\\_la\\_rupture](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mécanique_de_la_rupture)
- 16/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cristallite>
- 17/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Densité>
- 18/ [https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium-lithium\\_alloy](https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium-lithium_alloy)
- 19/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Corrosion>
- 20/ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Matière\\_première\\_minérale\\_critique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Matière_première_minérale_critique)
- 21/ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste\\_des\\_matières\\_premières\\_stratégiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_matières_premières_stratégiques)
- 22/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Recyclage>
- 23/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminium#Production>
- 24/ Par exemple : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Coulée\\_continuée](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coulée_continuée)
- 25/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonderie>
- 26/ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fabrication\\_additive](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fabrication_additive)
- 27/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Forgeage> ; <https://fr.wikipedia.org/wiki/Laminage>
- 28/ Par exemple : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Emboutissage>
- 29/ Encore tout un monde ! [https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement\\_de\\_surface](https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_de_surface)
- 30/ [https://fr.wikipedia.org/wiki/CFM\\_International\\_LEAP-X](https://fr.wikipedia.org/wiki/CFM_International_LEAP-X)
- 31/ [http://automotive.arcelormittal.com/automotive/saturnus/sheets/E\\_FR.pdf](http://automotive.arcelormittal.com/automotive/saturnus/sheets/E_FR.pdf)
- 32/ <http://www.ingenieur-ferroviaire.net/evenements/20070912-Visite-Corus-Hayange.doc>
- 33/ <http://www.pamline.fr/saint-gobain-pam/innovations>
- 34/ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage\\_à\\_mémoire\\_de\\_forme](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage_à_mémoire_de_forme) ; <http://www.nimesis.com/domaine/nimesis-advanced-devices/applications-types/videos/>

# Science des matériaux Numérique

Bernard Dussoubs, Institut Jean Lamour - Nancy

Ingénieur de l'Université de Lorraine, il est un spécialiste de la simulation numérique des matériaux et procédés. Il a en charge la grosse plateforme de calcul de l'Institut Jean Lamour.

En recherche sur les matériaux, la simulation numérique est une démarche essentielle, à côté de la théorie et de l'expérimentation, pour produire de nouvelles connaissances<sup>1</sup>. Dans l'industrie, le recours au calcul est une nécessité pour développer des produits innovants.

On met en œuvre sur ordinateur des modèles qui tentent de représenter la réalité physique. Cela permet de remplacer les expériences qui ne peuvent pas être menées car elles sont dangereuses (accidents), trop longues (climatologie) ou inaccessibles (astrophysique). La simulation évite aussi les cycles d'essai-erreur, pour mettre au point un nouveau matériau ou une nouvelle filière d'élaboration. Chaque essai se révélant coûteux, un modèle prédictif permettant de déterminer les voies les plus prometteuses est financièrement intéressant.

Dans le domaine des matériaux, on regroupe en 3 gammes l'échelle d'élaboration d'un produit, qui va de quelques atomes jusqu'à la tonne (lingots d'alliages par exemple)<sup>2</sup>:

- Echelle nanoscopique, jusqu'à quelques milliers d'atomes. Les modèles sont basés sur la mécanique quantique (résolution de l'équation de Schrödinger) : modèles ab initio (figure 1), théorie de la fonctionnelle de densité, dynamique moléculaire, méthode Monte-Carlo par exemple.
- Echelle mésoscopique : c'est l'échelle centrale. On ne considère plus les atomes individuellement, mais on ne peut pas encore utiliser les équations de la mécanique classique. Si plusieurs phases cohabitent dans un volume, il est pratique d'utiliser un champ de phase<sup>3</sup> (figure 2), qui décrit l'évolution d'un paramètre à travers une interphase diffuse.
- Echelle macroscopique : c'est l'échelle du produit. On applique les équations de la mécanique classique (conservation de la masse, de l'énergie, ...). Les méthodes numériques associées sont souvent basées sur un maillage. Dans chaque maille ces équations sont résolues pour donner une valeur de température, vitesse, composition, etc.<sup>4</sup> (figure 3).

Sur un ordinateur classique, le temps de calcul peut être réhibitoire (plusieurs semaines ou mois). Une solution pour pallier cette difficulté consiste à réaliser le calcul en parallèle, c'est-à-dire diviser l'ensemble du calcul en plusieurs centaines ou milliers de tâches séparées, effectuées sur un processeur différent, sur des machines pouvant contenir plusieurs milliers, voire dizaines de milliers d'unités de calcul. Par exemple, le supercalculateur Curie du CEA de Bruyère-le-Châtel est équipé de plus de 80 000 cœurs de calcul<sup>5</sup>.

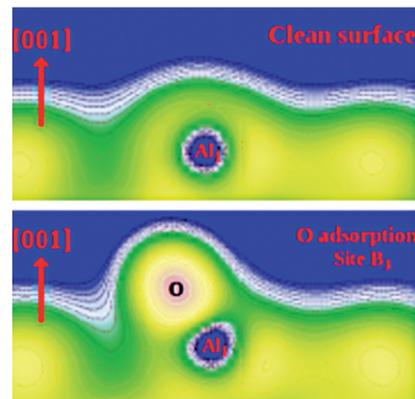


Figure 1 : Calcul par une méthode « ab initio » de la modification de la densité de charges due à l'adsorption d'un atome d'oxygène à la surface d'un composé  $Al_2Co$ . La partie haute de la figure montre la densité de charges avant adsorption et celle du bas après adsorption. Ce type de calcul permet de mieux comprendre les propriétés catalytiques du composé.  
Crédit : S. Alarcón-Villaseca, IJL, Nancy.

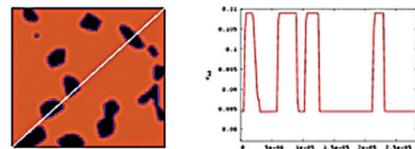


Figure 2 : Fraction molaire d'aluminium dans une matrice de titane carrée de 20 µm de côté (à gauche). La concentration est codée par un jeu de couleurs allant du noir (concentration en aluminium maximale) à l'orange (concentration en aluminium minimale). Le profil de concentration en aluminium le long de la ligne blanche est représenté à droite. On peut ainsi définir dans ce volume une concentration moyenne en aluminium, qui sert de référence dans un calcul à l'échelle supérieure.  
Crédit : B. Appolaire, IJL, Nancy.

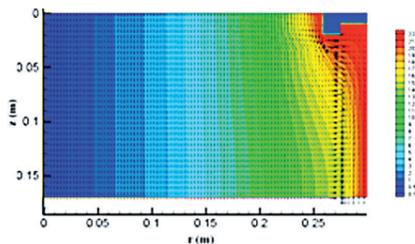


Figure 3 : Représentation du champ magnétique (codé en couleurs) et des vecteurs de densité de courant (petites flèches) dans un lingot d'alliage de titane raffiné sous laitier de 30 cm de rayon. En fonction de la résistance électrique de la zone en proche paroi ( $r > 0,27$ ), qui est constituée de laitier solidifié, on peut caractériser le passage du courant électrique dans la paroi de la lingotière (en rouge,  $r > 0,28$ ) qui entoure le lingot. Jusqu'alors, les modèles considéraient qu'il y avait isolation parfaite et qu'aucun courant ne passait, ce que réfutait l'expérience. Ce nouveau modèle confirme ce passage de courant.  
Crédit : M. Hugo, IJL, Nancy.

1/ M. DeFranceschi, Modélisation et simulation numériques en chimie du solide : principes et applications, Techniques de l'ingénieur, AF 6 040, pp 1-20.

2/ I.N. Levine, Quantum Chemistry, Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1991, 4e éd.,

3/ [http://www.physics.mcgill.ca/~provatas/papers/Phase\\_Field\\_Methods\\_text.pdf](http://www.physics.mcgill.ca/~provatas/papers/Phase_Field_Methods_text.pdf)

4/ S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, CRC Press, 1980.

5/ <http://www-hpc.cea.fr/fr/complexe/tgcc-curie.htm>

# La Céramique

Jean-Marie Haussonne, Université de Caen - Caen

Professeur émérite de l'Université de Caen et spécialiste des technologies céramiques, il a assumé la fonction de délégué régional pour la recherche et la technologie (DRRT) en région Bretagne.

Lorsque l'on cite un matériau, on associe souvent un qualificatif donnant une indication sur sa composition. Par exemple, un matériau métallique, un matériau semi-conducteur, un matériau organique, etc. Dans le cas d'un matériau céramique, ce n'est pas du tout le cas !

Bien souvent, le mot céramique est associé à des objets fabriqués à partir de produits argileux. Cependant, une céramique est, de manière beaucoup plus générale, quels que soient sa composition et son usage, définie comme étant réalisée en mettant en œuvre une technologie céramique consistant à façonner à la forme désirée un objet composé de poudres minérales, le plus généralement des oxydes, puis à le consolider et lui conférer ses propriétés définitives par cuisson à haute température, induisant des processus de diffusion.

Le céramiste pratique un des plus vieux métiers du monde, depuis que l'homme ayant inventé le feu s'est rendu compte que la terre argileuse ainsi chauffée perdait une fois humidifiée ses propriétés de plasticité tout en ayant acquis une certaine tenue mécanique. Éléments majeurs de l'Histoire de l'Homme, les céramiques ont été de tous temps des éléments économiques et stratégiques fondamentaux, même si trop souvent, nous ne les remarquons plus.

Les céramiques à base de matériaux argileux ont facilité dès l'antiquité le transport des denrées solides ou liquides et ont donc contribué au développement du commerce. Dans cette même famille, il y a les briques, les tuiles, les carreaux de sol et de revêtements muraux, les objets décoratifs, les objets culinaires, sans oublier les grès qui ont participé à l'essor de l'industrie chimique. Les premiers matériaux réfractaires ont permis d'abord la préparation des métaux et des verres, et leur plus grande maîtrise le développement des industries sidérurgique et verrière.

Les céramiques dites techniques, réalisées le plus souvent à base de matériaux oxydes (qualifiés par les anglo-saxons d'oxydes céramiques), jouent un rôle essentiel dans notre vie moderne. La technologie céramique permet de mettre en œuvre des composants pour l'électronique ou l'électrotechnique dont on exploite une ou plusieurs propriétés en présence d'un champ électrique continu ou haute fréquence pour réaliser des condensateurs, des composants de protection, des matériaux magnétiques, des actionneurs, des résonateurs, l'interconnexion des circuits intégrés et d'autres applications indispensables au développement de l'électronique ou de l'informatique. Les céramiques pour applications thermomécaniques mettent en œuvre des

matériaux possédant des propriétés particulières de ténacité, de tribologie ou de résistance à l'usure inégalables à haute température. Les céramiques pour applications biomédicales associent des qualités mécaniques à des qualités de biocompatibilité avec le corps humain. Cette liste ne saurait être exhaustive, faute d'espace, mais on ne saurait oublier que tous les combustibles nucléaires sont, sans exception, des oxydes mis en forme par la technologie céramique.

En résumé, la Céramique est un Art, dans le sens le plus large du terme (Figures). Elle a gagné depuis plusieurs siècles le qualificatif de Science.<sup>1</sup> Science de la dispersion et de la manipulation des poudres fines, science de la chimie de l'état solide, science de la diffusion. C'est aussi - et surtout - la rencontre d'un ensemble de techniques ou de technologies.

1/ J.M. Haussonne, P. Carry, J. Barton, P. Bowen, Céramiques et Verres, Traité des Matériaux, vol. 16, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Lausanne, ISBN 2-88074-605-1.



Figures : Exemples d'objets céramiques : vase ancien (1), tête de prothèse de hanche (2), composants pour moteur automobile (3) et composants pour circuits électronique (4).

# “Les matériaux et l'énergie”



**Etienne Patoor,**  
Georgia Tech Lorraine - Metz

*Professeur à Georgia-Tech Lorraine et à l'ENSAM de Metz. Il s'intéresse aux propriétés mécaniques des matériaux et tout particulièrement aux alliages à mémoire de forme.*

**Le développement de matériaux à hautes performances constitue un facteur essentiel pour relever les défis actuels en matière d'énergie. Les problématiques matériaux sont présentes dans les façons d'économiser l'énergie, de la produire, de la stocker, voire de l'utiliser de façon innovante et concernent des secteurs industriels aussi différents que les transports, la production d'énergie ou la technologie des semi-conducteurs. Répondre à ces défis impose de concevoir des matériaux à même de satisfaire à des cahiers des charges de plus en plus exigeants.**

Les progrès considérables accomplis par la communauté scientifique dans la compréhension et la modélisation des interactions complexes à l'œuvre entre la physique et la mécanique des matériaux aux différentes échelles de la microstructure constituent la clé autorisant ces développements. En effet, il n'existe pas de matériau miracle qu'il suffirait d'utiliser pour que le but visé soit atteint. A chaque fois, il faut résoudre un problème complexe d'optimisation faisant intervenir le processus de fabrication et les conditions d'usage du composant souhaité. Cette façon de procéder n'a rien de nouveau et les maîtres-artisans ont su réaliser depuis des temps immémoriaux des prouesses dans ce domaine, les sabres des samourais ou les cloches



Héphaïstos forgeant les armes d'Achille

des cathédrales en sont quelques exemples. Ce qui est nouveau, c'est que cette optimisation doit désormais s'appliquer à des objets du quotidien ne présentant qu'une valeur d'usage limitée. Ce qui est nouveau, c'est de passer du dieu Héphaïstos forgeant les armes d'Achille à un processus industriel capable de produire en grande série des pièces de structure légères et résistantes pour l'automobile de Monsieur Tout-le-Monde. Réussir ce passage implique de mettre plus de science dans la fabrication des composants afin de pouvoir utiliser au mieux l'ensemble des interactions procédés-microstructure-propriétés d'usage et passe de plus en plus souvent par l'obtention d'un matériau nano-structuré. Cet article tente d'illustrer cette problématique au travers de quelques réalisations obtenues en Lorraine en mécanique des matériaux et en photonique.



## ALLÈGEMENT DES STRUCTURES

Diminuer le poids des structures dans le domaine des transports apporte un gain sensible en termes d'économie d'énergie. Il existe plusieurs solutions pour réduire ce poids. La première, et la plus évidente, consiste à substituer un matériau par un autre plus léger. Cette solution, simple en apparence, peut cependant impliquer de profondes modifications dans les moyens à mettre en œuvre pour la production (passage d'une solution métal à une solution composite par exemple) et avoir des répercussions en termes de tenue en service. Une seconde solution consiste à conserver le matériau initial en augmentant sa résistance mécanique grâce à une optimisation de sa microstructure. Cette seconde solution réduit de façon significative l'épaisseur des éléments de structure et donc leur poids pour un même chargement mécanique. Elle impacte également les procédés de mise en œuvre et la tenue en service. Il devient, par exemple, nécessaire de prendre en compte l'effet de la réduction de l'épaisseur sur la résistance au flambage de la structure. Pour les deux solutions, l'identification des mécanismes élémentaires de déformation ou d'endommagement ainsi que la compréhension des relations intervenant entre la microstructure d'une part, et les propriétés de mise en forme et d'usage des matériaux, d'autre part, sont impératives. Cette thématique est très présente en Lorraine. Le Laboratoire d'Excellence DAMAS (Design des Alliages Métalliques pour Allègement des Structures), porté par l'Université de Lorraine et soutenu par le CNRS, a été constitué en 2012 pour développer une recherche fondamentale de haut niveau en associant les forces de recherche en métallurgie du Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3) à Metz et du Département SI2M (Science et Ingénierie des Matériaux et Métallurgie) de l'Institut Jean Lamour (IJL) à Nancy. Les travaux portent sur les relations entre les procédés de fabrication et la genèse des microstructures, les propriétés mécaniques des matériaux et des structures et le développement des approches de modélisation multi-échelle.

L'Institut de Recherche Technologique M2P (Matériaux, Métallurgie, Procédés) constitué en Lorraine en 2013 s'attache lui aussi à améliorer les propriétés mécaniques des produits par la conception et le contrôle des microstructures dans l'objectif de faciliter le transfert vers l'industrie de procédés innovants pour les métaux et les composites à matrice organique.

### Matériaux composites

Sous l'impact des réglementations environnementales, l'industrie automobile emploie des composites thermoplastiques pour un nombre croissant de composants. Il s'agit principalement de composites à fibres courtes, utilisés pour leur relative facilité de mise en œuvre par injection. Les matrices polyamides, bénéficiant d'un ratio performance/coût favorable, sont largement utilisées. Le comportement mécanique de ces composites dépend fortement de l'état microstructural (distribution et orientation des fibres) induit par le procédé de fabrication (Figure 1) et l'ensemble de la chaîne procédé-microstructure-propriétés-tenue en service doit être prise en compte pour s'assurer de la performance de la solution matériau retenue. Trois mécanismes différents contrôlent l'endommagement dans les composites : la décohésion interfaciale fibre/matrice, la rupture des fibres et la microfissuration de la matrice. A cela s'ajoute la sensibilité de la matrice aux conditions environnementales (humidité, température, fréquence de sollicitation). Il est de ce fait très difficile d'estimer la tenue en service pour un composant donné et cette absence d'outils de design prédictifs limite l'usage de ces composites pour la réalisation de pièces de structure. L'utilisation des techniques de simulation multi-échelle et leur intégration dans le processus de conception des composants deviennent dès lors essentielles pour prendre en compte la complexité de la microstructure. Des projets ambitieux, comme le projet FUI DURAFIP porté par Solvay et auquel contribue le LEM3, s'attachent à lever les verrous scientifiques pour parvenir à un tel développement (Figure 2).

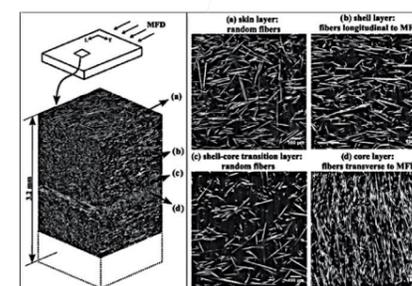


Figure 1 : Observation par microtomographie de l'évolution de la microstructure 3D dans un composite PA66 à fibres courtes (source LEM3-Metz).

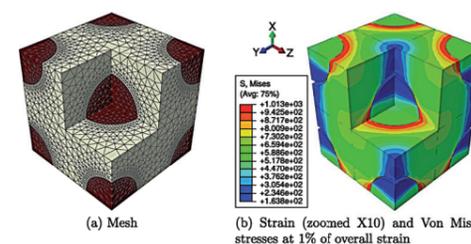


Figure 2 : Simulation numérique de l'endommagement et du transfert de charge dans un composite particulaire.

L'utilisation de composites à fibres longues dans des applications pour l'automobile doit en plus faire face à des problèmes de mise en œuvre, les procédés utilisés étant pour la plupart manuels ou semi-automatisés. L'IRT M2P a récemment mis en service sa plateforme technologique Fast RTM et réalisé pour le secteur automobile la première démonstration de fabrication haute cadence d'une pièce composite de grande dimension. Cette plateforme s'est vu attribuer le Jec Innovation Award 2017 dans la catégorie process, une distinction qui récompense les avancées les plus marquantes dans le domaine des composites.

### Alliages légers

Remplacer l'acier ou la fonte par un alliage léger conduit également à devoir lever de nombreux verrous scientifiques et technologiques. L'utilisation du magnésium en fournit un bon exemple. En raison de sa densité environ quatre fois inférieure à celle de l'acier, ce matériau présente un large champ d'applications potentielles pour l'automobile et l'aéronautique. Cependant, l'utilisation des alliages de magnésium reste cantonnée à la réalisation de pièces moulées. La faible ductilité présentée par ces alliages à température ambiante rend peu attractive leur utilisation pour la fabrication de pièces par des procédés de formage à froid, domaine où se situe la majeure partie des applications potentielles. Paradoxalement, la défor-

mation d'un monocristal de magnésium peut atteindre 100%. Dépasser cette limite impose de comprendre les mécanismes de déformation plastique activés dans le magnésium. Cela ne peut se faire sans recourir à un dialogue fort entre analyse expérimentale et simulation numérique afin d'étudier les deux mécanismes de déformation qui s'activent simultanément et interagissent, le glissement plastique par mouvement de dislocations et le maillage. Les observations microstructurales montrent que ce maillage se réalise à différentes échelles avec la formation de macles primaires elles-mêmes maillées (Figure 3). Une collaboration entre chercheurs messins a permis de relever ce défi en étudiant et en modélisant aux échelles appropriées les mécanismes participant à la déformation plastique du magnésium à température ambiante, permettant ainsi de quantifier les interactions entre ces mécanismes et de comprendre le rôle du maillage secondaire dans la déformation plastique.



Figure 3: Observation par EBSD des macles d'extensions primaire et secondaire dans un alliage de magnésium.

## Aciers multiphasés à haute résistance

Cependant, la meilleure solution de remplacement pour une pièce en acier reste souvent la solution acier. Le développement d'aciers qui combinent forte ductilité et haute résistance permet d'alléger les véhicules en utilisant des tôles plus minces, donc plus légères, tout en augmentant la sécurité passive des passagers. Le bilan est donc très positif. Une des réponses des sidérurgistes à la demande d'aciers toujours plus performants est le développement d'aciers multiphasés. Ces aciers, dit TRIP (TRansformation Induced Plasticity) sont des aciers à microstructure complexe et évolutive qui mettent à profit la transformation de l'austénite en martensite au cours de leur mise en forme à froid pour obtenir des propriétés mécaniques spécifiques. Ces aciers atteignent des résistances de 800 MPa avec des allongements à rupture de 30% et sont largement utilisés dans l'industrie automobile comme pièces de renfort de structure. D'autres nuances d'aciers, comme les PHS (Press Hardened Steels) ont été développées pour la mise en forme à chaud de pièces de structure et de sécurité. La mise en forme s'effectue à l'état austénitique, puis le matériau subit une trempe qui le transforme en martensite. Les caractéristiques mécaniques obtenues sur pièces sont extrêmement élevées, ce qui permet d'atteindre des allègements de structure de l'ordre de 30 à 50% par rapport aux nuances conventionnelles. Le développement des aciers multiphasés a fait l'objet de nombreuses collaborations entre ArcelorMittal Research à Maizières-lès-Metz et les laboratoires Lorrains IJL et LEM3 tant sur les aspects d'évolution microstructurale que sur la modélisation du comportement thermomécanique des aciers à transformation de phase. Dans ces

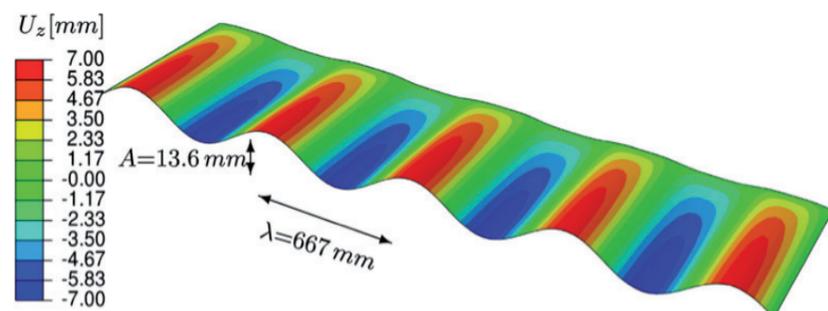


Figure 4: Couplage de modèles numériques pour le calcul des défauts de planéité liés aux contraintes résiduelles de laminage (source LEM3-Metz).

aciers, la transformation martensitique induite par la déformation plastique de l'austénite s'accompagne d'un fort niveau d'hétérogénéité des contraintes dans le matériau. Ainsi, l'étude de l'influence des contraintes résiduelles générées par les opérations de grenailage sur la tenue en fatigue des pièces de liaison au sol réalisées en acier TRIP constitue un axe majeur du projet CONDOR (CONtraintes DimensiOnnement Relaxation) piloté par l'IRT M2P. Le développement de ces nouveaux aciers exerce un profond impact sur la conduite des procédés. L'action combinée de l'augmentation de la résistance mécanique et de la réduction de l'épaisseur des tôles utilisées par l'industrie automobile favorise l'apparition de phénomènes d'instabilités qui génèrent des défauts de planéité au cours des opérations de laminage à froid (Figure 4). Ces défauts impactent la qualité des tôles produites et le contrôle de la planéité est devenue une préoccupation majeure pour les producteurs de tôles. Maitriser ce phénomène impose de résoudre un problème mécanique couplé prenant en compte le comportement

élasto-viscoplastique de la tôle, ainsi que les déformations élastiques des rouleaux du laminoir et les phénomènes d'instabilité par flambement se produisant à l'entrée et à la sortie de l'emprise du laminoir. Cela conduit à faire dialoguer plusieurs outils numériques de simulation comme cela a été réalisé au LEM3 en couplant la simulation par éléments finis du procédé de laminage avec la simulation du flambage sous contraintes résiduelles par la méthode asymptotique numérique.



Laminoir à froid

## MATÉRIAUX POUR L'ÉNERGIE

Les avancées dans le domaine de la production d'énergie reposent également largement sur le développement de matériaux à hautes performances. Qu'il s'agisse de prolonger la durée de vie des réacteurs nucléaires ou d'accroître le rendement énergétique des centrales électriques classiques, à chaque fois la problématique matériau se retrouve au cœur de l'équation à résoudre. Il en est de même pour la filière hydrogène où il est impératif de tenir compte des phénomènes de fragilisation et des défis posés en termes de stockage.

### Matériaux pour le nucléaire

Dans le cadre de sa politique énergétique, Electricité De France (EDF) envisage un prolongement de la durée de vie des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP). Etre en capacité d'affirmer que les conditions de sécurité de fonctionnement restent assurées constitue la condition sine qua non pour une telle prolongation. Dans cet objectif, de nombreuses études ont été lancées au niveau européen pour prendre en compte l'effet de l'irradiation (intensité du flux et dose cumulée) sur les composants critiques des réacteurs. L'optimisation de la durée de vie ne peut se faire sans une bonne compréhension des mécanismes physiques qui se produisent dans un matériau sous irradiation, ni sans une modélisation fine de ceux-ci. Plusieurs projets européens, auxquels contribue le LEM3, permettent de mieux comprendre l'influence de l'irradiation sur les évolutions de microstructure dans les aciers utilisés dans les composants des centrales et les conséquences de ces évolutions sur leur résistance à la fissuration. Ces projets combinent le développement de modèles de simulation numérique multiéchelle avec des analyses expérimentales afin de parvenir à estimer la durée de vie résiduelle d'un composant en fonction de son état métallurgique.

D'autres projets explorent des voies radicalement nouvelles en visant la conception de matériaux aptes à supporter sans dommage les conditions extrêmes régnant dans une centrale nucléaire. Les défauts ponctuels induits par les rayonnements ionisants altèrent profondément le comportement des matériaux et leur effet cumulé présente

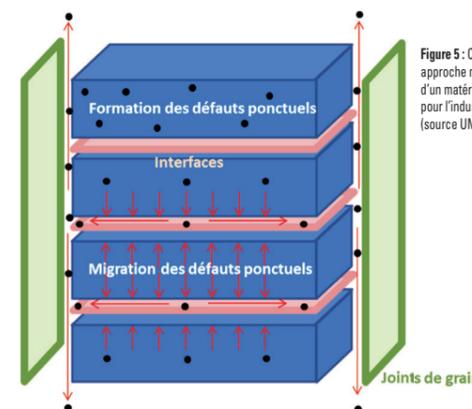
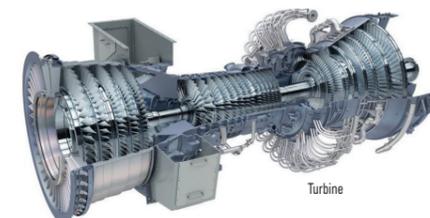


Figure 5: Conception par approche multiéchelle d'un matériau auto-cicatrisant pour l'industrie nucléaire (source UMI GT-CNRS)



une importance cruciale pour la sécurité des réacteurs nucléaires. L'accumulation de ces défauts s'effectue sur des sites préférentiels, elle se traduit par des phénomènes de fluage et conduit à l'affaiblissement de la résistance à la fissuration. Les interfaces, interphases et les joints de grains constituent une large part de ces sites préférentiels. Une telle affinité a été mise à profit dans le projet européen RadInterfaces coordonné par l'UMI Georgia-Tech CNRS pour concevoir un matériau auto-cicatrisant pour l'industrie nucléaire. L'approche utilisée couple des approches de modélisation ab-initio pour déterminer la cinétique de formations des défauts en fonction de la nature des interfaces avec des modélisations micromécaniques et des simulations macroscopiques par éléments finis pour investiguer les propriétés mécaniques de matériaux cristallins nanostructurés présentant de très grandes surfaces interfaciales (Figure 5).

### Hautes températures

Augmenter la température de fonctionnement d'une turbine reste le meilleur moyen d'améliorer son efficacité énergétique, que cela concerne un moteur d'avion ou une centrale électrique thermique au gaz. Mais cette solution nécessite de disposer de matériaux adéquats présentant à la fois une bonne stabilité thermochimique et de bonnes propriétés mécaniques, le tout pour un coût raisonnable au regard du domaine d'application visé. Grâce à ses bonnes performances mécaniques, sa faible densité et une remarquable résistance à la corrosion, le titane et ses alliages occupent une place croissante dans ce type d'application. L'utilisation de composites à matrice métallique constitués par une matrice en alliage de titane renforcée par des particules de céramique permet d'étendre leur utilisation à des zones plus sollicitées. L'obtention d'un

compromis entre amélioration des propriétés d'une part et réduction de la ductilité d'autre part, liées à l'augmentation de la fraction volumique des particules de renfort, impose d'optimiser la microstructure. Ceci nécessite de connaître les mécanismes de changements de phase se produisant au cours des différentes étapes d'élaboration du composite. Les études menées à l'Institut Jean Lamour montrent que l'identification de ces mécanismes nécessite la réalisation d'essais in situ sous rayonnement synchrotron.

### Stockage de l'hydrogène

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique pour les véhicules automobiles pose de nombreux problèmes de sécurité. Son stockage sous forme d'hydrure dans un matériau solide constitue une solution qui combine sécurité et encombrement réduit. La densité volumique de stockage de l'hydrogène dans le magnésium dépasse celle de l'hydrogène liquide (106 kg H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> contre 62 kg H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> à 700 bars). Le poids du métal pénalisant la capacité massive de stockage, seuls les alliages légers sont envisageables. L'hydrure de magnésium MgH<sub>2</sub> figure parmi les hydrures réversibles les plus légers, avec une densité énergétique de 2,4 kWh/kg. Le magnésium est par ailleurs un élément abondant, bon marché, recyclable et non polluant. Cependant, les cinétiques d'absorption et de désorption de l'hydrogène sont lentes et la thermodynamique impose d'opérer au-dessus de 300°C. Cette cinétique est une propriété extrinsèque, très fortement dépendante de la microstructure du matériau et l'utilisation de particules nanométriques favorise la diffusion rapide de l'hydrogène. La réalisation d'un composite nanostructuré par frittage de nanopoudres consolidées par déformation plastique sévère a été mise au point par le Labex DAMAS.



# Les diodes électroluminescentes

Dominique Dubaux, Académie Lorraine des Sciences - Nancy

Présidente de l'Académie Lorraine des Sciences, elle est agrégée de physique et a enseigné cette discipline durant de longues années.

Les LED (acronyme de Light Emitting Diode) sont de plus en plus utilisées comme source de lumière pour l'éclairage domestique, urbain, industriel et dans de nombreuses applications technologiques. Elles consomment peu d'énergie, ont une remarquable longévité, une excellente résistance mécanique, une taille réduite, un allumage pratiquement instantané.

## Petite histoire des LED

Le fonctionnement des LED est fondé sur l'émission de lumière par une association de deux semi-conducteurs - on parle de jonction - lorsque celle-ci est soumise à une tension électrique. Le champ électrique excite les électrons dans le matériau et ces électrons se désexcitent en émettant de la lumière. Le phénomène d'électroluminescence a été observé il y a plus d'un siècle mais ce n'est que dans les années 1960 que l'obtention de matériaux semi-conducteurs de meilleure pureté a permis de fabriquer des diodes émettant dans le rouge avec toutefois un flux lumineux trop faible pour l'éclairage, limitant ainsi les premières applications possibles aux seuls afficheurs lumineux.

## Des LED bleues à la lumière blanche

La couleur de la lumière émise est une propriété intrinsèque du matériau semi-conducteur utilisé puisque le photon émis a une énergie égale à celle de la bande interdite séparant le bas de la bande de conduction ( $E_c$ , niveau excité) du haut de la bande de valence ( $E_v$ , niveau fondamental) des électrons (Figure 1). Les semi-conducteurs à base de nitrures sont de bons candidats pour la production de lumière bleue mais ils rencontrent des difficultés technologiques majeures liées à la déformation importante de la structure cristalline du matériau. C'est pourquoi la LED bleue est demeurée un défi scientifique et industriel pendant plusieurs décennies. La première LED bleue à base de nitrure de gallium n'a été mise au point qu'en 1972 par des chercheurs de l'Université de Nagoya au Japon. Émettre dans le bleu était indispensable pour produire de la lumière blanche avec des LED, par synthèse additive des couleurs à des fins d'éclairage. Pour cela :

- Soit on associe deux LED, l'une émettant dans le bleu et l'autre dans le jaune,
- Soit on associe trois LED rouge, verte et bleue,
- Soit encore on associe une LED bleue à un luminophore bien choisi, qui émet dans un large domaine de fréquences centrées sur le jaune lorsqu'il est excité par la lumière bleue.
- Soit enfin on utilise une LED qui émet dans l'ultra-violet et que l'on associe à plusieurs luminophores émettant ensemble sur la totalité du spectre visible.

C'est la troisième de ces solutions, associant une LED bleue et un luminophore émettant dans une zone spectrale complémentaire qui est la plus disponible sur le marché (Figure 2). Les premières LED fabriquées sur ce principe à la fin du XX<sup>e</sup> siècle émettaient un blanc froid (6500K) qui était préjudiciable à la vision car susceptible de produire des lésions des cellules rétiniennes (DMLA) ou du cristallin. Cet éclairage engendrait aussi des troubles du sommeil par ralentissement de la production de mélatonine (hormone du sommeil). Grâce à l'amélioration des luminophores, les LED blanches émettent aujourd'hui un blanc chaud (2700K) rappelant la couleur des lampes à incandescence d'autrefois.

Les LED blanches actuelles trouvent leur éclairage optimal instantanément et produisent un flux lumineux moins nocif que celui des lampes fluo-compactes. Leur efficacité lumineuse (rendement de conversion de la puissance électrique en puissance lumineuse et répartition spectrale de l'énergie) est en constante progression de 100 lm.W<sup>-1</sup>. Leur durée de vie est en moyenne 50 fois plus longue que celle des lampes à incandescence d'Edison, ce qui permet de baisser considérablement la consommation de matériaux nécessaires à leur fabrication.

Le prix NOBEL de physique a été attribué conjointement en 2014 à NAKAMURA, AKASAKI et AMANO pour leur mise au point des LED émettrices de lumière bleue, qui ont ouvert la voie à des sources de lumière blanche intenses et économes en énergie. Le comité Nobel a souligné l'impact sociétal induit, lié à l'accès à l'éclairage à moindre coût pour une majeure partie de la planète (l'éclairage seul consomme aujourd'hui 20% de la production mondiale d'électricité).

A l'heure actuelle, les LED révolutionnent la luminothérapie, la chirurgie, l'agriculture. Gageons que cette technologie n'a pas fini de révéler ses potentialités et son influence sur nos existences.

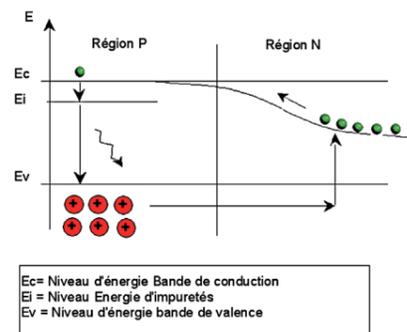


Figure 1 : L'application d'une tension électrique sur un semi-conducteur permet de faire passer des électrons de sa bande de valence (BV) à sa bande de conduction (BC). On observe donc la configuration suivante :  
 • la BV a perdu un électron. Elle a donc une place libre, appelé « trou » (en rouge)  
 • la BC a gagné un électron (en vert) qui peut alors conduire le courant.  
 Cette configuration n'est pas stable : l'électron excité vers la BC « retombe » dans la BV. La recombinaison électron-trou est continue et des électrons montent sans cesse dans la BC tandis que d'autres redescendent dans la BV pour boucher les trous.  
 Dans une LED, cette recombinaison électron-trou produit de la lumière. L'énergie du photon émis est égale à la différence d'énergie entre BC et BV et sa couleur est liée à ce saut énergétique.

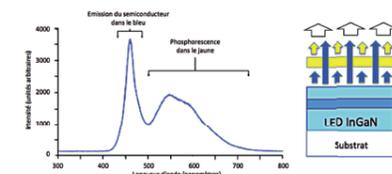


Figure 2 : À droite : de bas en haut, couches constitutives d'une LED émettant dans le bleu. Un substrat de saphir supporte un empilement d'une couche semi conductrice de nitrure de gallium et d'indium, suivi d'une couche intermédiaire puis d'une autre couche semi-conductrice de nitrure de gallium et d'indium. Si on recouvre ce dispositif d'un luminophore jaune, par synthèse additive la lumière émergente émise par la diode est blanche.  
 À gauche : spectre d'émission de cette LED blanche.

# Les catalyseurs

Julian Ledieu, Institut Jean Lamour - Nancy

Chargé de recherche au CNRS, il effectue une recherche originale sur de nouveaux catalyseurs issus des travaux de l'Institut Jean Lamour sur les alliages métalliques complexes.

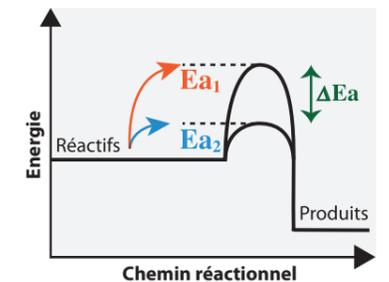
**Avec un marché mondial supérieur à 11 milliards d'euros<sup>1</sup> par an et en constante progression, la catalyse représente un secteur clé dans notre société.**

En fonction des phases en présence, la catalyse peut être homogène (par exemple, liquide-liquide), hétérogène (gaz-solide) ou enzymatique (molécules biologiques). Les catalyseurs, dont 90% fonctionnent en mode hétérogène<sup>2</sup> (Figure du bas), sont omniprésents dans la fabrication de près de 80%

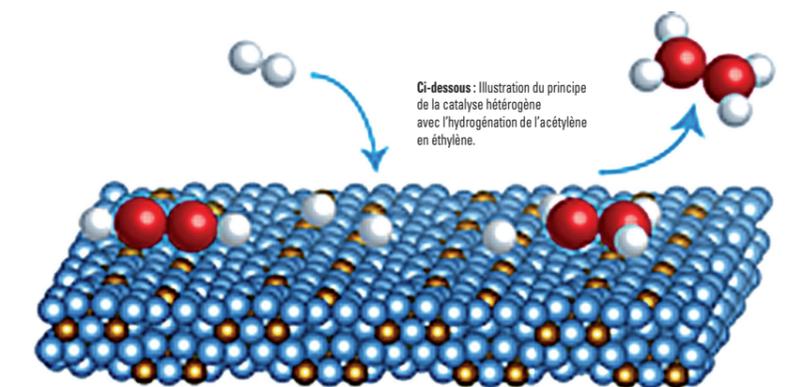
des produits chimiques<sup>1</sup>. Nous les retrouvons par exemple dans la production d'emballages plastiques, de produits pharmaceutiques, ou encore de produits d'entretien. Les catalyseurs ont aussi un impact dans la protection de l'environnement avec le traitement des eaux, des émissions gazeuses (industrie, véhicules) et dans le segment énergétique (raffineries - production de carburants). Le rôle d'un catalyseur est d'accélérer une réaction chimique en abaissant la barrière énergétique associée à la réaction (Figure du dessus) et d'être sélectif afin d'obtenir uniquement la réaction souhaitée et a fortiori le produit attendu. Ces propriétés réduisent d'une part les coûts énergétiques et d'autre part limitent les sous-produits et déchets issus de la réaction chimique tout en augmentant le rendement. Le catalyseur, qui n'intervient pas dans le bilan réactionnel, doit aussi être stable dans le temps et dans les conditions d'utilisation. Les contraintes environnementales, économiques et technologiques conduisent les industriels et les chercheurs à optimiser constamment ces procédés catalytiques et à innover en cherchant de nouveaux catalyseurs. Par exemple, il a été récemment démontré que le remplacement de métaux onéreux comme le palladium par de nouveaux alliages de structures complexes permettrait de réduire le coût du catalyseur<sup>3,4</sup>. Les enjeux actuels et futurs en catalyse se trouvent aussi en chimie durable où le développement de nouveaux procédés catalytiques est attendu pour utiliser des matières premières renouvelables, issues de la biomasse<sup>2</sup>.

Près de chez nous, les utilisateurs de catalyseurs sont nombreux (Dow Chemical, DuPont...). A titre d'exemple, nous mentionnerons l'usine de Thann du groupe Cristal<sup>5</sup> qui produit du dioxyde de titane ultrafin, matériau au cœur des technologies

catalytiques visant à éliminer les oxydes d'azote présents dans l'atmosphère et le sulfure d'hydrogène issu de l'industrie. L'établissement Butachimie (Solvay-Invista) à Chalampé concentre lui son activité sur la fabrication du nylon et la production d'intermédiaires polyamides<sup>6</sup> à l'aide de procédés catalytiques. Enfin, l'usine Arkema (Carling-Saint-Avold), producteur d'acide acrylique et de ses dérivés<sup>7</sup>, poursuit son optimisation des procédés acryliques et le développement de nouveaux catalyseurs.



Ci-dessus : Schématisation de l'abaissement de la barrière énergétique d'une réaction chimique ( $E_a$ ) grâce aux catalyseurs.



Ci-dessous : Illustration du principe de la catalyse hétérogène avec l'hydrogénation de l'acétylène en éthylène.

1/ Technologies clés 2010, Chiffres clés et Documentation (Nov. 2006), ©Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, Direction Générale des Entreprises, 12/2006. [https://archives.entreprises.gouv.fr/2012/www.industrie.gouv.fr/techno\\_clas\\_2010/html/sommaire.html](https://archives.entreprises.gouv.fr/2012/www.industrie.gouv.fr/techno_clas_2010/html/sommaire.html)

2/ La feuille de route de SusChem France 2010, Direction générale de la compétitivité de l'industrie et des services.

3/ M. Armbrüster, K. Kowin, M. Friedrich, D. Teschner, G. Wowsnick, M. Hahne, P. Gille, L. Szentmiklői, M. Feuerbacher, M. Heggen, F. Girgsdies, D. Rosenthal, R. Schögl, and Yu. Grin, *Nat. Mater.*, vol. 11, p. 690, 2012.

4/ J. Ledieu, E. Gaudry, L. N. Serkovic Loli, S. Alarcón Villaseca, M.-C. de Weerd, M. Hahne, P. Gille, Y. Grin, J.-M. Dubois and V. Fournée. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, p. 076102, 2013.

5/ <http://www.cristal.com/products-and-services/ultrafine-and-specialty-tio2/Pages/default.aspx>

6/ <http://www.solvay.fr/fr/implantations/chalampe/index.html>

7/ <http://www.arkema.fr/fr/arkema-en-france/implantations-est/carling/>

# Les nanomatériaux connectent les mondes réel et virtuel



**Stéphane Mangin**  
Institut Jean Lamour - Nancy

Professeur à l'Université de Lorraine, membre sénior de l'Institut Universitaire de France et membre de l'ALS. Physicien du Solide, il a consacré ses recherches au nano magnétisme et à l'électronique de spin. Il est responsable scientifique de l'équipement TUBE-Davm.

## LE MONDE VIRTUEL VA-T-IL CONTRÔLER NOTRE MONDE RÉEL ?

C'est l'une des questions que pose le développement de l'Internet des objets ou « Internet of things (IOT) ». Aujourd'hui en effet, le monde virtuel, de la toile, d'Internet, est en pleine expansion. Nos ordinateurs, nos téléphones, nos tablettes sont connectés à internet, ce qui permet un dialogue entre ces objets (messages, courriels, etc...) et donne accès à énormément d'informations (sur les sites d'information, les réseaux sociaux, etc...). Tout ceci conduit à ce que - chaque seconde - 29 000 Gigaocets (Go) d'information soient échangés dans le monde.

L'internet des objets permettra que l'ensemble des objets : voitures, appareils ménagers, maisons, aliments mais aussi plantes, animaux, êtres humains soient connectés (Figure 1). Pour 2020, plus de 5 milliards d'êtres humains utiliseront Internet et environ 80 milliards d'appareils seront connectés.<sup>1</sup>

Tous les domaines de la vie courante seront impactés : l'environnement, l'éducation, le transport, la logistique, la domotique, la médecine, la sécurité, etc. Par exemple, dans l'agriculture, l'internet des objets sera utilisé pour la gestion des engins agricoles, de l'utilisation des pesticides et des engrais, de la croissance des plantes et des animaux et l'optimisation de l'irrigation. Grâce à un collier spécial, il sera possible de contrôler les déplacements de chaque animal. Plus besoin de clôture électrique : une décharge électrique provoquée par le collier empêchera l'animal de sortir d'un certain espace défini grâce au signal d'un système type GPS.

Les « objets » auront donc la capacité de transmettre des informations contextuelles et d'être mis en réseau pour communiquer.

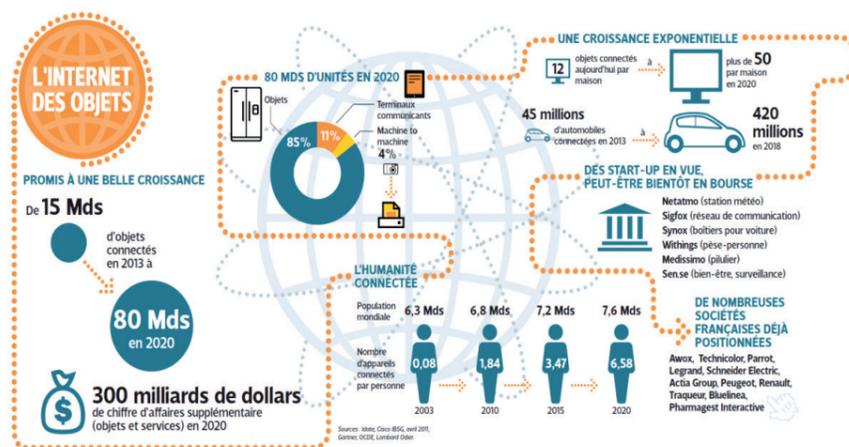
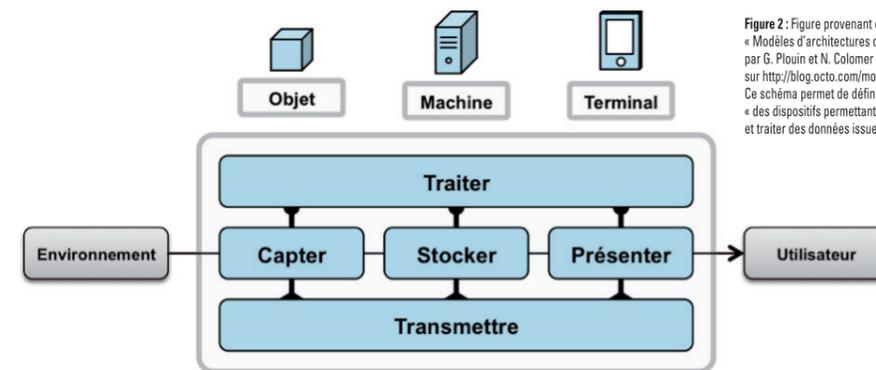


Figure 1 : Figure provenant de l'article Quand l'Internet des objets envahit tout... même la Bourse publié sur LesEchos.fr et consultable sur <https://investir.lesechos.fr/>. Ce schéma décrit le marché grandissant autour de l'Internet des objets.



## LES NANOMATÉRIAUX POUR CONTRÔLER LE MONDE VIRTUEL ?

Mais que faut-il pour faire fonctionner cet « internet des objets » ? Tout d'abord, il est nécessaire d'intégrer un capteur sur l'objet. Le capteur permettra d'obtenir les données désirées (température, vitesse, consommation électrique, localisation, etc.). Il faut un réseau capable de les transmettre à Internet (Figure 2). L'énorme quantité de données (on parle ici de Big Data) doit ensuite être stockée et traitée pour enfin être mise à la disposition de l'utilisateur sous forme d'informations via les ordinateurs industriels, les ordinateurs domestiques, les tablettes, les téléphones, les montres, etc. Il existe un monde bien réel derrière tout cela : le monde des matériaux. En effet, pourquoi peut-on stocker 15 Teraoctets<sup>2</sup> d'information (l'équivalent de 20 000 films) sur un seul disque dur alors que la capacité de stockage était 30 fois plus faible il y a dix ans ? Qu'est ce qui permettra demain de stocker encore plus d'information, plus vite et sur des surfaces encore plus petites ? Avec quoi fabriquera-t-on des capteurs miniaturisés, sans fils et qui n'ont même pas besoin de batterie pour fonctionner ?

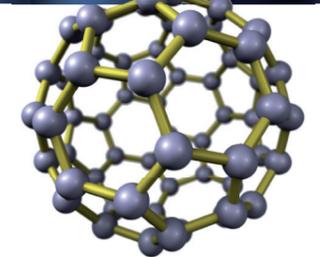
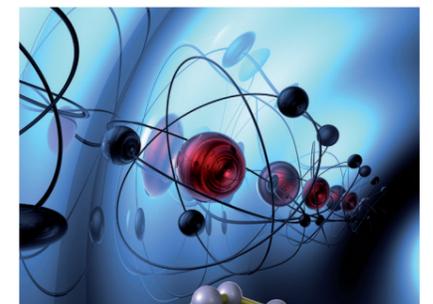
De tels développements dépendent étroitement des progrès réalisés par les scientifiques et les ingénieurs travaillant sur les nouveaux matériaux constituant les capteurs, les réseaux, les modules de stockage de l'information et du traitement des données. Ces éléments doivent présenter des caractéristiques de plus en plus spécifiques tout en étant extrêmement miniaturisés et rapides.

Dans le passé, la recherche de matériaux nouveaux et efficaces se caractérisait principalement par l'utilisation de méthodes empiriques, d'essai et d'erreur. Cette image de la science des

matériaux a changé au fur et à mesure que la connaissance et la compréhension des processus fondamentaux régissant les propriétés et les performances des matériaux ont augmenté. De nos jours, l'objectif de la science moderne des matériaux est d'adapter un matériau (en commençant par le choix de ses constituants, sa composition chimique, sa structure cristalline, sa structure électronique, ses propriétés de surface, etc.) afin d'obtenir un ensemble désiré de propriétés adaptées à une application donnée.

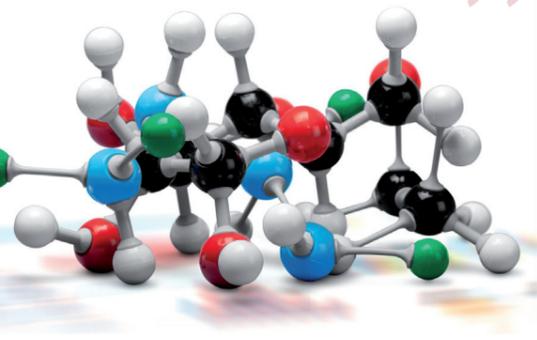
En outre, nous observons dans la communauté internationale un effort important pour réduire la taille des matériaux afin d'étudier leurs propriétés fondamentales et augmenter leurs performances. Ce faisant, le comportement des matériaux est alors régi par la structure électronique et les propriétés de leurs surfaces et interfaces. La basse dimension des objets et l'importance des surfaces et interfaces de ces matériaux conduisent à des propriétés significativement différentes de celles du volume. Les études sur ces nanomatériaux fourniront non seulement des informations sur les relations structure-propriété des matériaux mais aussi contribueront à générer de nouvelles idées et technologies pour la fabrication et l'application de ces matériaux dans le domaine de l'internet des objets par exemple. Les nanomatériaux sont développés à partir de presque tous les types de matériaux, y compris les métaux, les céramiques, les isolants, les semi-conducteurs, les composites et les molécules. Bien qu'ils ne soient confinés à aucune classe ou système de matières particulières, ils sont unis par la stratégie d'élaboration utilisée pour leur création : on parle en anglais de « Material by design ».

Ces nouveaux matériaux donneront lieu à de nombreuses applications dont un grand nombre ne sont pas imaginables aujourd'hui. En effet, les nanomatériaux sont bien connus pour avoir d'extraordinaires propriétés électriques, magnétiques, optiques, thermiques, catalytiques ou/et une forte résistance mécanique, ce qui offre de grandes opportunités pour construire des capteurs pour mesurer, ou surveiller diverses propriétés physiques, chimiques et biologiques. De multiples formes de nanomatériaux, tels que les nanotubes, les nanoparticules, les films minces, les hétérostructures sont largement étudiés et beaucoup reste à comprendre.



1/ <https://m.investir.lesechos.fr/actualites/quand-l-internet-des-objets-envahit-tout-meme-la-bourse-986680.html>  
2/ Un Tera vaut 1000 Giga, qui valent chacun 1000 Mega, soit au total 1 suivi de 12 zéros. 1 To=1 000 000 000 000 octets.

« Les nanomatériaux connectent les mondes réel et virtuel »



LES NANOMATÉRIAUX EN LORRAINE

Au cours des dix dernières années, en Lorraine, la communauté scientifique des matériaux a particulièrement investi dans la croissance, la structuration et la caractérisation des systèmes multi-matériaux avec un contrôle à l'échelle nanométrique. En effet à cette échelle, il est possible d'atteindre les longueurs critiques de nombreux phénomènes physiques.

Les phénomènes qui se produisent alors à cette échelle de longueur intéressent les physiciens, les chimistes, les biologistes, les ingénieurs électriques et mécaniques et les informaticiens, faisant de la recherche fondamentale en nanotechnologie, une activité de pointe en science des matériaux.



Figure 3 : Photo du Tube Davm implanté à l'Institut Jean Lamour sur le Campus ARTEM. Sur une longueur de 70 mètres, 30 équipements d'élaboration et de caractérisation de matériaux sont connectés sous ultra-vide (c'est à dire sous un vide de quelques 10<sup>-10</sup> mbar, équivalent au vide interplanétaire).



Le Grand Projet d'Équipement de l'IJL constitué du TUBE Davm (permettant l'interconnexion sous ultravide de moyens d'élaboration, d'analyse et de nano-structuration) et d'équipements environnants de caractérisation de matériaux à l'échelle nanométrique (microscopes, amincisseur par faisceau d'ions (FIB), liquéfacteur, lasers) en est un exemple.<sup>3</sup> Il vient s'ajouter aux plateformes spécialisées dans les micro et nanotechnologies en Lorraine MINALOR pour l'université de Lorraine à Nancy et l'Institut Lafayette construit aux abords de Georgia Tech Lorraine à Metz.

Ce grand Projet d'équipements uniques est développé dans le nouveau bâtiment de l'Institut Jean Lamour sur le site Artem-Molitor à Nancy, il permet d'interconnecter un large éventail de techniques d'élaboration, de caractérisation et de structuration des matériaux sous ultravide. La construction de cet outil unique au monde qu'est le Tube Davm peut être visionné sur le site web de l'Université de Lorraine.<sup>4</sup> Il est le pilier d'un ensemble de projets innovants dans les nanomatériaux initié par l'Institut Jean Lamour en collaboration avec d'autres acteurs académiques tels que les laboratoires LEMTA, LMOPS, CRM2, Interpsy et Georgia Tech CNRS, ainsi que des sociétés privées telles que Vinci Technologies, Viessmann ou encore Nipson. Le TUBE, unique en son genre (Figure 3), permettra aux différentes équipes concernées de répondre aux problématiques actuelles de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée dans le domaine des nanomatériaux en couplant des techniques de structuration multi-matériaux à des approches d'analyses multidimensionnelles.

Les deux études suivantes, très différentes, s'inscrivent dans la thématique de l'internet des Objets.

LE CORPS HUMAIN, UN DES OBJETS DE L'INTERNET DES OBJETS

Dans nos sociétés modernes, la nécessité de connaître en continu les paramètres du corps humain s'impose progressivement. Des applications militaires aux applications biomédicales/bien-être/sport, les objets connectés qui surveillent les paramètres corporels sont un besoin très important – et en croissance. Pourtant, la nécessité d'utiliser des fils/connectiques, des bracelets ou parfois des ceintures présente potentiellement des difficultés opérationnelles et empêche les utilisateurs de porter en permanence ces objets connectés.

Dans ce contexte, un nouveau champ a émergé : l'électronique sur peau ou «epidermal electronics»,<sup>5,6</sup> à savoir une nouvelle classe de dispositifs électroniques qui sont tatoués sur la peau d'une manière « transparente », et qui peuvent s'étirer, se plier, se tordre ou se conformer à n'importe quelle configuration (Figure 4). Ce champ de recherche est récent.<sup>3</sup> Il a été développé dans le groupe de recherche de John Rogers à l'Université d'Illinois à Urbana-Champaign, le groupe de référence au niveau mondial en électronique étirable, où le Dr Sami Hage-Ali de l'Institut Jean Lamour a effectué ses travaux de post-doctorat (Bourse Fulbright).<sup>7</sup>

Pourtant, l'électronique sur peau souffre encore de quelques limitations : elle nécessite souvent l'utilisation d'électrodes peu commodes pour mesurer différents paramètres (température, déformations, EEG, EMG). Par ailleurs, la mise en œuvre de batteries et de radios RF pour réaliser des émetteurs-récepteurs actifs de télétransmission dans ce format est extrêmement difficile.



Dans ce contexte, les dispositifs à base d'ondes acoustiques de surface (SAW) développés avec le Pr Omar Elmazria sont particulièrement pertinents.<sup>9,10</sup> On sait que ces dispositifs sont largement utilisés comme filtres, résonateurs ou lignes à retard dans les systèmes électroniques pour une large gamme d'applications aux communications mobiles, aux radars, ou en tant que résonateurs stables de génération d'horloge. La fréquence de résonance et le délai de transmission de signaux des dispositifs SAW peuvent être très sensibles aux paramètres physiques de l'environnement et les dispositifs SAW sont de plus en plus utilisés comme capteurs pour une grande variété de paramètres tels le gaz, la pression, la force, la température, la déformation, les radiations, etc. Les capteurs à base de SAW présentent l'avantage d'être entièrement passifs (sans batterie) et peuvent être interrogés en utilisant des techniques sans fil.

Au niveau international, le sujet présente une forte nouveauté : le couplage des domaines de l'électronique sur peau – qui est un domaine très récent – et du domaine de l'acoustique des ondes isolées pour réaliser des capteurs sans fils étirables à faibles pertes. Ces choix scientifiques sont extrêmement originaux par rapport à l'état de l'art et permettent d'envisager un positionnement international fort.

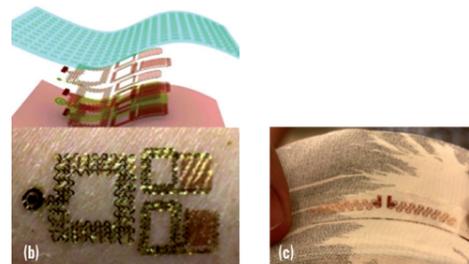


Figure 4 : (a) antenne étirable imprimée sur la peau,<sup>7</sup> (b) capteur d'hydratation sans fil<sup>8</sup> et (c) antenne étirable reportée sur un tissu.<sup>7</sup>

LA LUMIÈRE POUR STOCKER L'INFORMATION PLUS RAPIDEMENT ?

L'énorme quantité d'informations générées par l'Internet des Objets demande des espaces de stockage, et des vitesses de traitement gigantesques. Aujourd'hui la majorité de l'information stockée sur les ordinateurs et dans le nuage (cloud) est physiquement présente sur des disques durs.

Pour le disque dur, le stockage binaire de l'information (0 et 1) est réalisé sur un medium granulaire constitué de phases magnétiques nanoscopiques qui se comportent comme autant d'aimants au passage de la tête de lecture. Pour écrire l'information, il faut donc être capable de retourner l'aimantation de ces nano-aimants. Ceci est réalisé par l'intermédiaire d'un champ magnétique. Cette méthode atteint aujourd'hui ses limites et il ne semble plus possible d'augmenter la vitesse d'écriture et de lecture tout en accroissant la densité d'information stockée.

L'équipe « nanomagnétisme et électronique de spin » de l'Institut Jean Lamour, en collaboration avec des équipes de l'Université de Californie San Diego (UCSD), vient de montrer que l'on peut utiliser des pulses de lumière laser ultrarapides pour retourner ces petits aimants. Ce retournement d'aimantation « tout optique » découvert en 2007 n'avait jusqu'alors pu être observé que pour un type de matériau particulier : un alliage de cobalt, de fer et de gadolinium.<sup>11</sup> Le groupe de l'IJL a démontré que ce phénomène était beaucoup plus général et qu'un grand nombre de matériaux magnétiques pouvaient montrer cette propriété<sup>12</sup> parmi lesquels les milieux granulaires utilisés dans l'enregistrement magnétique.<sup>13</sup> Un faisceau laser polarisé permet de retourner l'aimantation de ces matériaux dans un sens ou dans l'autre. Il est ainsi possible d'enregistrer de l'information sur un matériau magnétique à l'endroit où le laser agit. Effectuer ces renversements d'aimantation par la lumière permet par ailleurs de stocker et de lire l'information beaucoup plus rapidement. En plus d'être bien plus rapide, ce phénomène de retournement d'aimantation semble nécessiter beaucoup moins d'énergie que les systèmes actuels.<sup>14</sup> Ces découvertes nous permettent d'envisager un stockage de l'information ultime plus rapide et moins gourmand en énergie (schématisé par les Figures 5 et 6) nécessaire au développement de l'internet des objets.

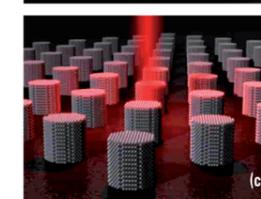
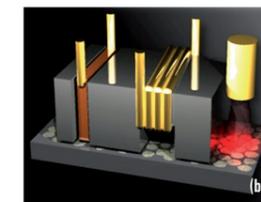


Figure 5 : Présentation de la future génération de disques durs où la tête de lecture volant au dessus du disque (a) est composée d'un laser (b) permettant de retourner des petits objets magnétiques d'environ 10nm (c).

Par rapport à la technologie des disques durs d'aujourd'hui, cela permettrait de multiplier par 10 la capacité de stockage et par 1000 fois la vitesse d'écriture de l'information.

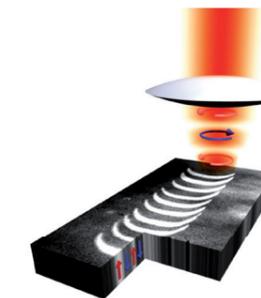


Figure 6 : Illustration de l'enregistrement miniaturisé de bits magnétiques à l'aide d'un faisceau laser femtoseconde. Cet enregistrement est réalisé en polarisant circulairement la lumière laser qui balaye le matériau magnétique tandis que la polarisation est modulée "droite" ou "gauche" pour créer des domaines magnétiques alignés respectivement vers le haut ou le bas (flèches rouges ou bleues).

6/ W.-H. Yeo, Y.-S. Kim, J. Lee, A. Ameen, L. Shi, M. Li, S. Wang, R. Ma, S. H. Jin, Z. Kang, Y. Huang and J. A. Rogers, Multifunctional Epidermal Electronics Printed Directly Onto the Skin, Adv. Mater., vol. 25, no. 20, pp. 2773-2778, 2013.  
 7/ S. Hage-Ali, W.-H. Yeo, Y. Su, M. F. Shaik, J. A. Fan, W. Lee, J. Lee, S.-Y. Jung, E. Topsakal, Y. Huang and J. A. Rogers, Meshed stretchable antennas, to be submitted to Advanced Materials, 2017.  
 8/ X. Huang, Y. Liu, H. Cheng, W.-J. Shin, J. A. Fan, Z. Liu, C.-J. Lu, G.-W. Kong, K. Chen, D. Patnaik, S.-H. Lee, S. Hage-Ali, Y. Huang and J. A. Rogers, Materials and Designs for Wireless Epidermal Sensors of Hydration and Strain, Adv. Funct. Mater., vol. 24, no. 25, pp. 3849-3854, 2014.  
 9/ M. Elhossni, O. Elmazria, A. Talbi, K. Ait Aissa, L. Bouvot, F. Sarry and S. Hage-Ali, FEM modeling of magnetic field SAW sensors based on magneto-piezoelectric layered structures, submitted to Sensors and Actuators A, 2014.  
 10/ O. Legrani, O. Elmazria, S. Zhigou, P. Pigeat and A. Bartsasyte, Packageless AlN/ZnO/Si Structure for SAW Devices Applications, IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 2, pp. 487-491, 2013.  
 11/ C.D. Stanciu, F. Hansteen, A.V. Kimek, A. Kirilyuk, A. Tsukamoto, A. Itoh, T. Rasing, Ultrafast Interaction of the Angular Momentum of Photons with Spins in the Metallic Amorphous Alloy GdFeCo, Phys. Rev. Lett., vol. 98, p. 207401, 2007.  
 12/ S. Mangin, M. Gottwald, C.-H. Lambert, D. Steil, V. Uhrir, L. Pang, H. Hehn, S. Alebrand, M. Cinchetti, G. Malinowski, Y. Faïman, M. Aeschlimann, E.E. Fullerton, Engineered materials for all-optical helicity-dependent magnetic switching, Nat. Mater., vol. 13, pp. 286-292, 2014.  
 13/ C.H. Lambert, S. Mangin, B.S.D.C.S. Varaprasad, Y.K. Takahashi, M. Hehn, M. Cinchetti, G. Malinowski, K. Hono, Y. Faïman, M. Aeschlimann, E.E. Fullerton, All-optical control of ferromagnetic thin films and nanostructures, Science, vol. 345, pp.1337-1340, 2014.  
 14/ M.S. El Hadri, M. Hehn, P. Piro, C.-H. Lambert, G. Malinowski, E.E. Fullerton, S. Mangin, Two types of all-optical magnetization switching mechanisms using femtosecond laser pulses, Phys. Rev. B, vol. 94, p. 064412, 2016.

# Le verre : un matériau vieux comme le monde et domestiqué par l'homme



**Christophe Rapin** (IJL, Nancy)  
**Laurent Tissandier** (CRPG, Nancy)  
**Denis Garcia** (CERPAV, Vannes le Châtel)

Professeur des Universités, Christophe Rapin enseigne la chimie des matériaux à la Faculté des Sciences et Technologies et à la Faculté d'Odontologie de Nancy. Chimiste de formation, ses activités de recherche, au sein de l'Institut Jean Lamour, sont consacrées à la réactivité des solides et notamment aux interactions verre fondu/matériaux. Il est Président du Réseau Verrier Lorrain, Révelor, depuis 2015.

Le verre accompagne depuis longtemps l'histoire humaine. Depuis plus de 100 000 ans, il est utilisé pour fabriquer des armes, des bijoux, des instruments ou encore pour la construction de bâtiments. Ces diverses applications sont possibles grâce aux multiples propriétés du verre, qui prises individuellement peuvent être observées dans d'autres matériaux mais qu'il est le seul à pouvoir associer. La recherche nous montre que nous sommes loin d'avoir exploré toutes les utilisations possibles du verre et que par conséquent, il restera un des matériaux les plus utilisés et les plus prometteurs dans les décennies à venir.

Les premiers objets en verre utilisés par l'Homme remontent à environ 100 000 ans et sont constitués d'obsidienne. Ce verre très sombre, d'origine volcanique, était grossièrement taillé pour obtenir des arêtes tranchantes qui permettaient de couper ou de s'en servir comme arme. D'autres verres naturels peuvent être rencontrés et sont toujours le résultat de phénomènes de haute température suivis d'un refroidissement rapide (Figure 1). Ainsi les fulgurites, sortes de tube de verre de silice (SiO<sub>2</sub>) sont-elles dues aux impacts de foudre sur un sol sableux. Les impactites, tectites et autre verre libyque résultent de l'impact d'une météorite sur la Terre, fondant très localement le sol en éjectant une partie à plusieurs centaines, voire milliers de kilomètres. D'autres échantillons vitreux peuvent être produits par les éruptions volcaniques, comme les cheveux de Pélé, longs filaments de verre éjectés lors d'une éruption, ou les pierres ponces, qui avant leur altération, étaient majoritairement vitreuses et résultaient des retombées des débris volcaniques et de leur compaction.



Figure 1 : Exemples de verres naturels  
 a : fulgurite<sup>1</sup> ;  
 b : tectites australiennes<sup>2</sup> qui doivent leur forme particulière au frottement de l'air lors de leur trajet dans l'atmosphère quand elles sont encore à l'état fondu ;  
 c : cheveux (filaments) et larmes (gouttelettes) de Pélé, Hawaï<sup>3</sup>.

Les premiers verres fabriqués par l'Homme datent d'environ 4000 ans av. J.C. (Egypte) ce qui en fait le matériau d'usage synthétique le plus ancien<sup>4</sup>. C'est vraisemblablement fortuitement que cette matière brillante, plus ou moins translucide, fut découverte en brûlant des végétaux ou en chauffant du natron (carbonate de sodium utilisé pour la conservation des momies) sur un sol sableux. Tout d'abord moulé pour en faire des récipients ou des bijoux, le verre fut ensuite soufflé à partir du I<sup>er</sup> siècle av. J.C. (Moyen-Orient : Phénicie ou Babylone) (Figure 2) ce qui multiplia les réalisations possibles et accéléra le développement d'une véritable industrie sur tout le bassin méditerranéen. Au Moyen Age, ce sont surtout les verres colorés qui se multiplièrent en Europe Occidentale, ainsi que les techniques de fabrication des verres plats, tout ceci pour obtenir les plus beaux vitraux possibles. C'est également à cette époque que les manufactures vénitiennes prirent leur essor et dominèrent la production verrière avec leur *Cristallo* (verre très pur). Les XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles virent l'apparition de nouveaux verres, par exemple le cristal de Bohême ou le verre au plomb (Angleterre). En France, naît la manufacture de Saint-Gobain voulue par Colbert, pour fournir les glaces du palais de Versailles, et des cristalleries comme celle de Saint-Louis. Par la suite, la révolution industrielle a fait évoluer principalement les techniques de production (étirage, fonte en continu, fibrage, etc.) et quelques nouveaux verres ont vu le jour comme le *Pyrex* (1915). De par la présence des ressources nécessaires (sable, potasse, bois, ...) et sa situation sur les routes commerciales entre Europe méditerranéenne et Europe du Nord, l'Est de la France a toujours été et reste encore aujourd'hui, une grande terre de verriers.



Figure 2 : Dessin représentant des souffleurs de verre, Egypte, I<sup>er</sup> siècle av. J.C.

## LE VERRE, UN LIQUIDE ?

Si on doit définir un verre, on peut considérer ce matériau comme un liquide figé. La structure d'un verre à l'échelle atomique est similaire à celle d'un liquide. Il n'existe donc aucun ordre à grande distance. Un verre peut être représenté comme un réseau tridimensionnel dans lequel seul l'ordre à courte distance est conservé. Ainsi la structure de la silice cristalline (quartz) est constituée par l'agencement ordonné de tétraèdres SiO<sub>4</sub>, alors que celle de la silice vitreuse correspond à un empilement anarchique de ces mêmes tétraèdres (Figure 3).

La différenciation entre solide cristallisé et solide vitreux s'effectue au refroidissement (Figure 4). A la température de fusion (ou cristallisation) T<sub>f</sub>, le liquide devient solide, ce qui se traduit par une mise en ordre des atomes. On dit que le liquide a cristallisé, entraînant une contraction brutale de volume (trajet rouge). Ce passage liquide-cristal correspond à une transition s'effectuant à l'équilibre. Dans le cas d'un liquide suffisamment visqueux à T<sub>f</sub>, un refroidissement rapide peut permettre la formation d'un liquide en surfusion. Les atomes n'ayant pas le temps de s'arranger les uns par rapport aux autres, les cristaux n'apparaissent pas. Le volume de ce liquide se place d'abord dans l'extrapolation de l'évolution du volume au-dessus de T<sub>f</sub>, puis à une température appelée T<sub>g</sub>, il y a rupture de pente de la courbe volume/température signalant la transition vitreuse (trajet vert). La structure moléculaire en-dessous de T<sub>g</sub> reste donc similaire à celle du liquide.

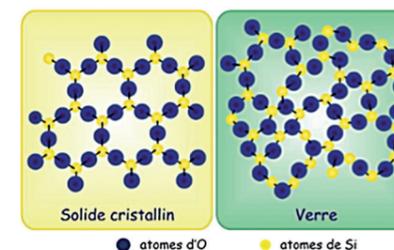


Figure 3 : Représentation schématique en 2 dimensions de la silice cristallisée (à gauche) et de la silice vitreuse (à droite). Pour chaque tétraèdre centré par un atome de silicium, il existe un quatrième atome d'oxygène situé dans un plan au-dessus de celui de la figure et qui n'est pas dessiné ici.

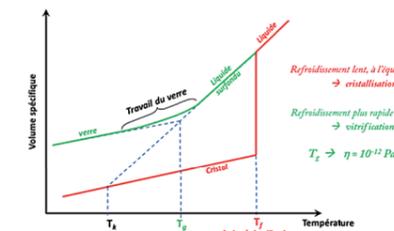


Figure 4 : Courbes de refroidissement d'un composé cristallisé (en rouge) comparée à celle d'un composé amorphe (en vert).

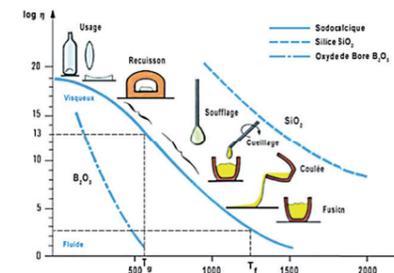


Figure 5 : Evolution de la viscosité de différents verres avec la température et principales étapes de mise en forme.

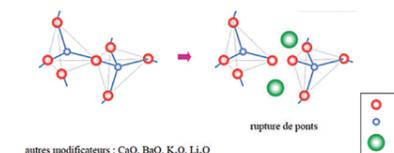


Figure 6 : Représentation schématique de l'action des modificateurs de réseau sur le réseau de silice.

Les matériaux vitreux voient leur viscosité augmenter avec le refroidissement (Figure 5). Chaque phase du travail du verre se fera pour une viscosité (η) donnée : par exemple, la fusion des matières premières pour η = 10<sup>3</sup> Pa.s (à titre de comparaison, η de l'eau = 10<sup>-3</sup> Pa.s à 25°C), mise en forme, soufflage, étirage, coulée, etc. pour η = 10<sup>7</sup> à 10<sup>14</sup> Pa.s. Un verre se caractérise aussi par ses températures de ramollissement (pour η = 10<sup>12</sup> Pa.s) et de transition vitreuse (T<sub>g</sub> pour η = 10<sup>12</sup> Pa.s).

De nombreuses substances sont vitrifiables, comme les éléments soufre, phosphore, les oxydes tels que la silice, les oxydes de germanium, de bore, les phosphates, etc. La suite de l'article est focalisée sur les verres silicatés qui sont les plus couramment utilisés. La silice ayant un point de fusion élevé (~1700°C), l'ajout de fondants diminue fortement les températures de fusion et la viscosité. Ces fondants sont des oxydes alcalins Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, ... et alcalino-terreux comme CaO, MgO, introduits généralement sous forme de carbonates. Ils sont appelés modificateurs de réseaux car du point de vue moléculaire, ils ouvrent le réseau siliceux (Figure 6) par rupture des liaisons Si-O-Si. D'autres composants comme Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO, ... peuvent être ajoutés pour modifier les propriétés de ces verres à base de silice.

1/ <http://www.treasuremountainmining.com/index.php?route=pavblog/blog&id=43>  
 2/ <https://museumvictoria.com.au/melbournmuseum/discoverycentre/dynamicearth/overview/meteorites/tektites/>  
 3/ <http://www.amusingplanet.com/2015/09/peles-hair-and-peles-tears.html>  
 4/ <http://www.societechimiquedefrance.fr/verre.html>

Poids %	Verre à vitre	Bouteille	Pyrex	Cristal	Lampe halogène	Vitral posassique	Déchet vitrifié
SiO <sub>2</sub>	72	74	81	57	60	50	52,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6	1	2	0,4	14,3	2,6	12,5
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			12				
SO <sub>2</sub>	0,7				0,3	0,07	0,07
CaO	10	5,4			6,5	15,6	18,9
MgO	2,5	3,7				5,3	2,4
BaO					18,3	0,1	0,1
PbO				27			0,85
Na <sub>2</sub> O	14,2	15,3	4,5		6	0,9	5,9
K <sub>2</sub> O		0,6		9,6			2
ZnO						17,8	0,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						1,1	1,3
MnO						0,9	0,1

Table 1 : Composition des verres les plus utilisés.



Figure 7 : Procédé de soufflage automatique pour l'élaboration de bouteilles (Saverglass).



Figure 8 : Assiette observée en cours de fibrage de laine de verre d'isolation (Saint Gobain).

## ÉLABORATION DU VERRE

En 2016, la production mondiale de verre atteignait 140 millions de tonnes, dont plus de la moitié (72 Mt) était du verre plat. Selon leurs usages, ces verres ont des compositions, des propriétés, des formes et donc des modes de production différents (Table 1).

Toutefois, plusieurs étapes se retrouvent dans tous les procédés verriers :

- ▶ les pesées et le mélange des matières premières (sable, carbonate de sodium, potasse, calcaire, oxyde de plomb, élément colorant, ...) et de calcin (verre recyclé, minium 10%) afin d'obtenir la composition;
- ▶ la fusion qui permet le passage de la composition d'une poudre grossière à l'état liquide ;
- ▶ l'affinage et l'homogénéisation qui permettent, pour le premier, le départ des espèces gazeuses produites lors de la fusion (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>,...), minimisant ainsi la présence de bulles dans le verre, et pour la seconde, le brassage du bain fondu pendant plusieurs heures pour obtenir, en sortie, des verres homogènes ;
- ▶ la mise en forme du verre qui peut éventuellement ensuite recevoir un traitement de surface pour améliorer certaines propriétés ;
- ▶ la recuisson qui consiste à éventuellement réchauffer le verre puis contrôler sa vitesse de refroidissement afin de relâcher les contraintes internes emmagasinées lors de la mise en forme.

Ces différentes étapes se font soit dans des fours différents, soit dans des zones différentes d'une même ligne de production :

- ▶ Fusion, affinage et homogénéisation se font généralement à la suite, dans le même four, entre 1200 et 1600°C selon les compositions. Ces installations, appelées fours à bassin peuvent atteindre 300 m<sup>2</sup> de superficie, et produire jusqu'à 4 t/m<sup>2</sup>.j de verre. Pour les productions industrielles, juste avant la mise en forme, la température est abaissée entre 1000 et 1300°C (contrôle de la viscosité) et le verre est envoyé dans la partie mise en forme par des *feeders*;

▶ Selon les produits, ces *feeders* peuvent déboucher sur des bains d'étain pour le verre plat de type *float*, sur des lignes de soufflage ou pressage-soufflage pour les verres de conditionnement (bouteille, flacons, etc.) (Figure 7), sur des lignes de laminage (plaques vitrocéramique), etc. ;

▶ La recuisson se fait dans des fours appelés arches ou étendries pour le verre plat et dure généralement plusieurs heures.

Pour les productions artisanales, le verre est élaboré dans des fours plus limités en taille, les fours à pots, dans lesquels le verre va rester plusieurs heures avant d'être utilisé par le verrier. Ces fours peuvent être équipés de plusieurs pots afin d'avoir à disposition plusieurs couleurs par exemple. Une fois homogénéisé, la quantité de verre nécessaire (la *paraison*) est manuellement *cueillie* par le verrier à l'aide d'une canne métallique, et ensuite mise en forme par pressage et/ou soufflage avant de passer dans le four de recuisson.

Les coûts de ces productions verrières ainsi que l'évolution des normes environnementales ont fait évoluer ces fours. Initialement chauffés au bois puis au charbon, la plupart fonctionnent maintenant au gaz (fours à flammes) ou électriquement, les deux pouvant être combinés au sein d'une même unité. Le principe du four à bassin électrique est basé sur le fait que le verre devient conducteur au-delà de ~800°C. Une fois cette température atteinte, le verre agit comme une résistance et est donc chauffé dans la masse, par effet Joule, à l'aide d'électrodes implantées dans la sole (base) du four et baignant dans le verre. De nombreux systèmes de récupération de chaleur (à tubes, à parois, régénérateur, ...) permettent aussi de minimiser l'apport énergétique et de diminuer les émissions polluantes. Les fumées sont dépolluées afin de limiter les envolements de poussières (filtration simple) ainsi que le rejet des produits nocifs. Ces techniques de production doivent s'adapter aux nouvelles applications. Des systèmes de traitement, par plasma pour des dépôts de couches minces, par cémentation pour améliorer la résistance chimique et mécanique des verres, etc. sont progressivement ajoutés aux lignes de production.

## GRANDE VARIÉTÉ DE TECHNIQUES DE MISE EN FORME : DE LA HAUTE TECHNOLOGIE À L'ARTISANAT

Le verre peut accepter quasiment toutes les mises en forme possibles. Il peut être coulé, moulé, injecté, soufflé, étiré, laminé, soudé... et usiné, alors que ses homologues céramiques, sont, pour la plupart, uniquement frittés et usinés.

Parmi les procédés de mise en forme, certains font appel à de la haute technologie, comme l'élaboration de la fibre d'isolation ou le verre flotté. Le fibrage du verre a été mis au point et développé par la société Saint Gobain<sup>6</sup>. Par les *feeders*, du verre fondu se déverse en continu à haute température dans une assiette de fibrage (en superalliage métallique). Cette assiette, chauffée selon le type de verre, au voisinage de 1100°C, tourne à très grande vitesse (environ 2000 tr/mn). La paroi externe est une couronne percée de milliers de trous calibrés par lesquels des fibres sont expulsées sous l'action de la force centrifuge. A leur sortie, elles sont étirées par les gaz chauds et rapides d'un brûleur annulaire (Figure 8).

L'élaboration du verre plat (vitrage) se fait par le procédé de *flottage* (*float glass* en anglais). Le verre en fusion est coulé sur un bain d'étain fondu. La différence de densité des deux matières ( $d_{\text{verre}} = 2,5$  et  $d_{\text{étain}} = 7$ ) et leur immiscibilité permettent à l'une de flotter sur l'autre. Sous l'effet de son propre poids, le verre s'étale et se stabilise en une feuille continue aux faces planes et parallèles. À la sortie du four (longueur moyenne d'une unité : 400m), une glace de 6m de large est obtenue avec une surface exempte de défaut.

D'autres procédés se sont mécanisés et/ou automatisés pour la réalisation des flacons et les objets de l'art de la table. Dans ce dernier cas, notamment pour les articles de luxe en cristal (Baccarat<sup>7</sup>, Saint Louis<sup>8</sup>, Lalique<sup>9</sup>, etc., Figure 9), on fait toujours appel à des procédés manuels tels que le soufflage. Le cristal permet également la réalisation d'objets en pâte de verre. Ce procédé, maîtrisé par la société Daum<sup>10</sup>, consiste à faire refondre un assemblage de morceaux de cristal colorés, judicieusement choisis, dans un moule en plâtre.

« Le verre : un matériau vieux comme le monde et domestiqué par l'homme »

## LE VERRE, UN COMPOSÉ AUX PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES PARTICULIÈRES

Les verres constituent donc un ensemble extrêmement varié de produits avec des propriétés innombrables<sup>11</sup>. Ces propriétés dépendent de la composition chimique, et des traitements subis, notamment thermiques. Cependant, tous les matériaux vitreux présentent une caractéristique commune : leur isotropie due à leur nature amorphe (absence de microstructure). D'une façon générale, les verres sont mécaniquement fragiles, mais présentent avant rupture un comportement élastique quasi-idéal. Ils sont également très durs. Du point de vue optique, ils sont dans leur grande majorité, transparents et peuvent être colorés. Le verre est un bon isolant thermique. Il est également un bon isolant électrique à basse température et devient conducteur d'électricité s'il est chauffé au-delà de T<sub>g</sub>. Du point de vue chimique, le verre est assez inerte. Des verres naturels très anciens (plusieurs millions d'années) et des objets archéologiques en verre bien conservés attestent de cette stabilité. Même si sa réactivité est très lente, le verre s'altère au contact d'une solution aqueuse<sup>12</sup>. Cette corrosion peut être observée (Figure 10) sur des vitraux anciens (grisaille). Elle dépend de plusieurs facteurs comme la composition du verre, le pH et la composition de la solution altérante, les conditions hydrologiques et la température. La corrosion des verres fait l'objet de nombreuses études actuelles en vue d'estimer la durabilité chimique de ces matériaux. Pouvoir estimer ces vitesses d'altération est crucial pour l'industrie du nucléaire qui emploie le verre comme matrice de confinement de ces déchets radioactifs. Introduits dans la matrice vitreuse lors de la fusion, ses radionucléides sont ainsi stabilisés et peuvent ensuite être entreposés dans différents sites.



Figure 9 : Exemples d'objets d'art de la table en cristal, lequels sont un verre chargé au plomb, voir la Table 1 (Baccarat).



Figure 10 : Phénomène d'altération d'un vitrail ancien (grisaille).

## LE VERRE : UN SAVOIR FAIRE ET UNE DYNAMIQUE EN LORRAINE

C'est en Lorraine, aujourd'hui en région Grand Est, que subsistent les dernières cristalleries françaises. Saint-Louis, la plus ancienne d'entre elles, et bien sûr Baccarat, Daum, Lalique, possèdent chacune une renommée mondiale dans le secteur du luxe. Ces manufactures ont su s'illustrer depuis plus de 250 ans par la qualité de leurs productions, et les prouesses accomplies grâce aux savoir-faire de leurs maîtres verriers, attachant ainsi définitivement leur image et celle du territoire régional à l'excellence, au luxe et à toutes les qualités du cristal (éclat, transparence, sonorité). La perpétuation des acquis a toujours été un enjeu important dans ces activités de main d'œuvre à forte plus value créative. Ces entreprises ont de tout temps investi dans l'apprentissage et la formation, mettant un soin particulier à la transmission portée par les Meilleurs Ouvriers de France ou encore les *Maîtres d'art*, titres officiels sanctionnant de très hauts niveaux de savoir-faire.

Le *Cerfav*<sup>13</sup> est né dans les années 90 à Vannes Le Châtel (Meurthe et Moselle) de cette même préoccupation de formation et de sauvegarde des savoir-faire, mais en considérant toutefois une dimension

supplémentaire, celle de soutenir la démarche créative et artistique des élèves et en convoquant tout savoir-faire ou innovation sans restriction. Aujourd'hui la région dispose d'une série d'acteurs gravitant autour de cette dynamique qui en fait un véritable pôle de compétences d'où est issue la plupart des artisans d'art, designers ou artistes verriers s'installant en France et à travers lequel interagit l'association *Révebor*<sup>14</sup>. Cette société savante réunit des laboratoires universitaires, les manufactures régionales et les industriels français, et les centres techniques, autour de problématiques de recherches fondamentales et appliquées. L'inventaire ne serait pas complet si nous en venions à oublier les somptueuses collections Art Nouveau et Art Déco des musées nancéiens, avec les verreries de Gallé, les pâtes de verre de Walter, les collections des frères Blaschka à Strasbourg, les vitraux de Grüber à Nancy ou de Chagall à Sarrebourg et Metz qui suffisent à ravir les visiteurs.

La région sait présenter son patrimoine et inciter au développement verrier comme une signature à part entière et en soutenant toutes initiatives permettant de voir perdurer cette activité.

## CONCLUSION

Le verre est le plus ancien matériau utilisé par l'Homme. De nos jours, il se rencontre dans beaucoup de domaines comme le bâtiment, le flaconnage, l'art de la table, la décoration... Le verre a également pris une part importante dans le domaine du développement durable et des économies d'énergie (fibres d'isolation, panneaux photovoltaïques). Il a longtemps été considéré comme un solide inerte, insoluble et stable dans le temps. Cependant, à l'heure actuelle, des interrogations planent sur la stabilité de ce matériau, et sur l'éventuelle migration de certains éléments du verre vers le milieu extérieur. De nouvelles matrices verrières plus stables et l'élaboration, en surface du verre, de revêtements limitant les échanges, sont à l'étude. La recherche sur les dépôts connaît par ailleurs depuis ces dernières années un essor important, ce qui s'est traduit par le développement de surfaces vitrées autonettoyantes, anti-bactériennes, photochromes, etc. Enfin, de nouvelles techniques de mise en forme sont également en train de voir le jour avec des possibilités de réalisations verrières par des imprimantes 3D. Pour résumer, le verre est donc loin d'avoir livré tous ses secrets et le Grand Est, avec ses sites de production et ses unités de recherche, prend une part très active dans les nouvelles applications de ce matériau protéiforme.

5/ <https://www.isover.fr/connaitre-isover/notre-savoir-faire/fabrication-des-laines-minerales>  
6/ <https://www.isover.fr/connaitre-isover/notre-savoir-faire/fabrication-des-laines-minerales>  
7/ <http://www.baccarat.fr/fr/tables-des-merveilles/>  
8/ <http://www.saint-louis.com/fr>  
9/ <http://www.lalique.com/fr>

10/ <http://daum.fr/savoir-faire/>  
11/ <http://www.primeverre.com/tout-sur-le-verre/proprietes/>  
12/ <http://www.infovitrail.com/index.php/fr/proprietes-du-verre/>

13/ *Cerfav* : Centre Européen de Recherches et de Formation aux Arts Verriers. Voir : <http://www.cerfav.fr/>  
14/ *Révebor* : Réseau Verrier Lorrain. Voir : <http://www.revebor.fr/>

# Les matériaux issus du carbone



**Cathie VIX-GUTERL**  
Institut de Sciences  
des Matériaux de Mulhouse  
- Mulhouse

**Directrice de recherche au CNRS.**  
*Elle a consacré ses recherches aux matériaux à base de carbone et plus particulièrement à l'étude de leurs propriétés de surface en interaction avec l'environnement.*  
**Elle a fondé l'Institut de Science des Matériaux de Mulhouse et l'Institut Carnot MICA, deux structures qu'elle dirige actuellement.**



Quel que soit le secteur industriel, le constat est toujours le même : les développements technologiques dépendent indéniablement du progrès des matériaux. C'est pourquoi la synthèse, la caractérisation et l'utilisation de matériaux dotés de propriétés innovantes ou spécifiques améliorées restent au cœur des priorités des programmes de recherche tant sur le plan national qu'international.

Ceci est particulièrement vrai pour les matériaux carbonés qui sont plus que jamais des matériaux de premier choix pour des secteurs d'activités stratégiques tels que, par exemple, l'aéronautique, l'aérospatial, le stockage d'énergie, la dépollution, etc. L'engouement pour ces matériaux est en particulier dû au fait qu'il peuvent exister sous différentes formes (particules, fibres, composites, graphite, nanotubes de graphène, etc.) aussi bien à l'état naturel que synthétique et que leurs propriétés chimiques et physiques (réactivité, structure, surface et porosité, entre autres) peuvent être modulées à façon. Ils restent ainsi une source inépuisable aussi bien comme objet d'études pour la recherche fondamentale qu'en tant que matériaux de pointe pour les développements technologiques. Les matériaux carbonés répondent indéniablement aux attentes des secteurs industriels et participent à lever les verrous technologiques et les défis sociétaux du 21<sup>ème</sup> siècle mis en évidence par les exemples donnés dans ce document.

## LE CARBONE, TÉMOIN DE L'HISTOIRE DE L'UNIVERS ET DU DÉVELOPPEMENT DES CIVILISATIONS

En étant l'un des éléments les plus abondants dans l'univers, le carbone est un élément fondamental de la vie sur Terre. Témoin de l'histoire de l'univers, le carbone naturel se retrouve dans les poussières interstellaires et les météorites. Sur Terre, il est présent dans les mines de charbon, de graphite et de diamant. Dès la préhistoire, il a été utilisé comme combustible puis réducteur de métaux.

Le carbone artificiel obtenu par pyrolyse de matières organiques est, quant à lui, un marqueur du développement des civilisations depuis la plus haute antiquité. Il a ainsi été utilisé comme encre en Chine, adsorbant en Égypte, réducteur d'oxydes métalliques au Moyen Orient, poudre noire dans l'alchimie au Moyen Age, etc. La première utilisation connue d'un matériau carboné comme remède contre les problèmes gastriques date de l'Égypte ancienne en 3750 av. JC. Vers 850 avant Jésus-Christ, des moines taoïstes exploitent le caractère pyrotechnique et explosif de charbons de composition spécifique. À partir de ce moment, le développement des armes à feu, allant des fusils aux canons, va se produire et ainsi changer radicalement les techniques militaires dans le monde.

## LES DIFFÉRENTS ÉTATS DU CARBONE

Le carbone existe sous différentes formes allotropiques : le carbone amorphe, le graphite, le diamant, les carbynes, les fullerènes (appelés tout d'abord les 'footballènes' en raison de leur ressemblance avec un ballon de football), les nanotubes de carbone et le graphène. Cette dernière forme a été mise en évidence expérimentalement en 2004 par André Geim qui a reçu le prix Nobel de Physique en 2010 avec Konstantin Novoselov pour cette découverte. Le graphène est la forme particulière du graphite en couches constituées d'un seul atome de carbone en épaisseur. Le graphène conduit le courant électrique sur des distances de plus de mille fois son épaisseur, sans résistance. Il présente une conductivité thermique et une résistance mécanique élevées, il est léger et quasi-transparent et constitue une barrière infranchissable à l'eau et aux gaz. Ses propriétés sont notamment intéressantes pour la création de puces électroniques et d'écrans flexibles.

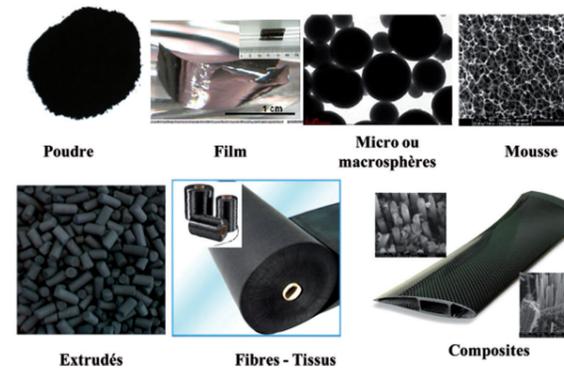


Figure 1 : Le carbone sous toutes ses formes.

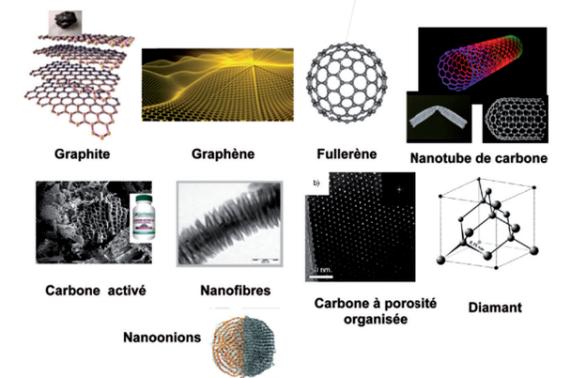


Figure 2 : Le carbone dans tous ses états

## LES DIFFÉRENTES MORPHOLOGIES DU CARBONE

Une des richesses de ce matériau est également de pouvoir exister sous différentes formes morphologiques. On peut le trouver sous forme de particules, de monolithes, de nanotubes de carbone, de fibres, de tissus, de composites à matrice organique ou céramique. Ces morphologies variées et ces différents états du carbone sont illustrés dans les Figures 1 et 2.

## CARACTÉRISTIQUES DU CARBONE

Le carbone cristallin pur existe dans la nature sous forme de diamant et de graphite. Les propriétés physiques et chimiques du carbone dépendent de la structure cristalline de l'élément. Sa densité fluctue entre 2,25 g/cm<sup>3</sup> pour le graphite et 3,51g/cm<sup>3</sup> pour le diamant. Le point de fusion du graphite est de 3500°C. Le carbone élémentaire est inerte et insoluble dans l'eau ou les solvants organiques. À température élevée, il se lie avec l'oxygène pour former le monoxyde ou le dioxyde de carbone. Nous connaissons plus d'un million de composés qui possèdent du carbone lié à l'hydrogène, ainsi qu'un grand nombre de composés inorganiques qui contiennent du carbone. Les hydrocarbures exclusivement formés de carbone quadrivalent et d'hydrogène constituent le plus grand groupe des composés du carbone. Le carbone réagit tout particulièrement bien avec le fluor pour former des halogénures de carbone comme le chlorofluorocarbure, CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, aussi appelé fréon, gaz employé jadis dans les systèmes de refroidissement. On retrouve également le carbone lié à l'hydrogène dans toutes les plantes et tous les animaux. L'affinité unique du carbone avec les autres éléments le conduit par liaisons chimiques successives, à former de longues chaînes de molécules, comme celles des acides aminés, des protéines ou de l'ADN. De nombreux métaux se combinent avec cet élément à température élevée pour former des carbures.

## PROCÉDÉS DE FABRICATION POUR OBTENIR UN PANEL DE MATÉRIAUX CARBONÉS À PROPRIÉTÉS MAÎTRISÉES ET VARIÉES.

La diversité des matériaux carbonés provient des différents procédés de préparation pouvant être mis en œuvre. Ces procédés sont souvent simples à exploiter industriellement et font, dans certains cas, appel à des précurseurs issus de la biomasse.

Très schématiquement, 3 voies principales conduisent à l'obtention de carbone synthétique :

- ▶ Les voies physiques à partir d'un solide qui peut être du carbone ou du graphite utilisant des techniques telles que l'évaporation thermique, les lasers, la décharge électrique, l'énergie solaire, etc.
- ▶ Les voies mécaniques à partir d'un solide parmi lesquelles le broyage, l'exfoliation, la détonation-implosion, etc.
- ▶ Les voies chimiques à partir de précurseurs organiques (bois, saccharose, noyau de cerise, noix de coco, etc.), d'hydrocarbures gazeux ou liquides (brai de houille ou de pétrole) et de polymères (notamment pour la fabrication de fibres).

Les carbones obtenus sont de deux types, en fonction du précurseur utilisé et des conditions de fabrication : les carbones dits graphitables et les carbones non-graphitables. Pour la première catégorie, ils pourront être chauffés à des températures entre 2000 et 3000°C pour guérir les défauts présents dans la structure et tendre vers la structure du graphite hexagonal.

Le dernier arrivé dans la famille des carbones, à savoir le graphène, peut être produit par des voies mécaniques (par exemple, en décollant le dernier plan en surface d'un cristal de graphite à l'aide d'un ruban adhésif ou à partir d'une mine de crayon), physiques à partir du carbure de silicium, par décomposition catalytique à haute température d'un gaz carboné ou par des voies chimiques (oxydation du graphite dans un milieu acide et traitement par un solvant réducteur pour purification). Une autre méthode simple et efficace a été récemment proposée pour la fabrication de graphène à partir d'un mélange de graphite, d'eau et de détergent, à l'aide d'un mixeur de cuisine à très haute vitesse ! Mais la qualité du matériau obtenu reste faible. Très récemment, des équipes françaises ont publié dans *Nature Chemistry*, la possibilité d'obtenir des dispersions de graphène à partir d'un sel de graphite dissous dans de l'eau dégazée. 'L'eau de Graphène' est née ainsi !

Tous les types de carbone peuvent faire l'objet de modifications de composition, de surface, de structure et de porosité par des post-traitements physiques, chimiques ou mécaniques. Des hétéroatomes peuvent également être introduits dans la structure carbonée pour en modifier les propriétés. À chaque carbone, son post-traitement en fonction des caractéristiques finales recherchées pour le matériau, en lien avec les performances applicatives recherchées.



## LES MATÉRIAUX CARBONÉS : UNE SOURCE INÉPUISABLE D'APPLICATIONS DANS TOUS LES SECTEURS D'ACTIVITÉS.

De par leur diversité en termes de morphologie, de structure, de propriétés de surface, de porosité, les matériaux carbonés bénéficient à des secteurs applicatifs très divers. Dans l'impossibilité d'en donner une liste complète, des exemples emblématiques ont été sélectionnés.

Sous la forme d'élément libre, le carbone présent dans le diamant sert en joaillerie et dans l'industrie pour sa dureté. Le graphite est employé comme lubrifiant, pour fabriquer des creusets et se retrouve aussi dans les mines de crayon.

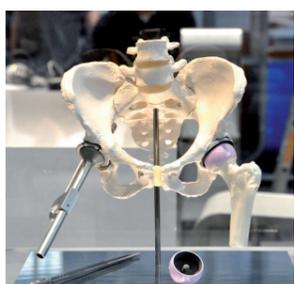


Extincteurs CO<sub>2</sub>

Sous forme composée, les applications du carbone sont très nombreuses. Le CO<sub>2</sub>, par exemple, est notamment employé pour gazéifier les boissons, dans les extincteurs, ou encore comme réfrigérant, sous forme de glace sèche, dans l'industrie des semi-conducteurs. Le monoxyde de carbone (CO) sert de gaz réducteur dans beaucoup de processus industriels. Les hydrocarbures constituent les principaux composants du pétrole et du gaz naturel et la matière première de l'industrie pétrochimique. Les polymères (caoutchouc, polystyrène, élastomères) sont aussi des hydrocarbures. Les carbures métalliques ont des utilisations importantes en raison de leur excellente tenue mécanique à haute température ou pour la découpe des métaux et sont appréciés pour leur grande résistance à la chaleur.



MOD'70



Prothèse osseuse

Les matériaux carbonés sont également utilisés comme adsorbants sélectifs vis-à-vis de polluants gazeux et aqueux, matériaux de stockage de gaz, catalyseurs et supports de catalyseurs, matériaux pour la production d'énergie thermique, l'amendement ou la fertilisation des sols (ce type de matériau carboné est préparé à partir de ressources agricoles ou issus de l'industrie agroalimentaire), matériaux pour les articles de sport (le trimaran de la classe MOD'70 est entièrement construit en carbone), prothèse osseuse ou vasculaire, matériaux d'électrode pour le stockage électrochimique de l'énergie et composites pour les industries aéronautiques et aérospatiales. Enfin, les propriétés exceptionnelles du graphène sont particulièrement intéressantes pour la création de puces électroniques et d'écrans flexibles.

Pour toutes ces applications, les recherches ne cessent de se poursuivre pour développer de nouveaux matériaux à base de carbone ou optimiser les matériaux par l'ajout par exemple d'une nouvelle fonction rendant le matériau plus performant. Il existe d'ailleurs près de Hambourg une 'Carbon Valley' regroupant une centaine de sociétés travaillant sur ce matériau innovant, ce qui souligne son fort intérêt industriel.

Les matériaux carbonés sont donc des matériaux très prisés par les secteurs industriels les plus stratégiques. A titre d'exemple, deux applications seront détaillées dans la suite du texte, illustrant le potentiel de ces matériaux pour répondre aux défis technologiques du 21<sup>ème</sup> siècle.

### Les matériaux carbonés : un acteur majeur pour la transition énergétique.

L'indépendance énergétique est un enjeu majeur pour nos sociétés, ce qui justifie d'intensifier les recherches pour améliorer les moyens de production et de stockage de l'électricité indispensables pour les appareils portables, la gestion des ressources en énergies renouvelables et le développement de la voiture électrique. Les recherches pour développer des dispositifs de stockage d'énergie tels que les batteries et les supercondensateurs s'accroissent considérablement et les moyens humains et financiers engagés pour les améliorer n'ont jamais été aussi importants. Batteries et supercondensateurs ne sont pas à opposer. Au contraire, ces deux systèmes de stockage permettent d'obtenir une solution plus efficace lorsqu'ils sont utilisés conjointement. La batterie est utilisée pour sa capacité à stocker plus d'énergie pour un poids et un volume donnés (meilleure densité d'énergie). Le supercondensateur peut en revanche se recharger et se décharger 10 000 fois plus rapi-



Figure 3 : Voiture tout électrique utilisant des composites à fibres de carbone.

dement qu'une batterie et apporter une puissance extrêmement élevée en un court laps de temps. Combiner batterie et supercondensateur permet d'éviter les sollicitations trop violentes sur la batterie qui altèrent sa durée de vie, tout en gagnant en puissance. Les voitures d'Autolib associant batterie et supercondensateurs en sont un excellent exemple.

Le stockage d'énergie dans ces deux systèmes se fait grâce à leur capacité à transférer et stocker les particules chargées appelées ions provenant d'un électrolyte. Dans une batterie, les réactions chimiques déplacent les ions de l'électrolyte vers l'intérieur de la composante constituant l'électrode. Pour les batteries lithium-ion commerciales, l'électrode négative est constituée de carbone et plus particulièrement de graphite permettant l'insertion/désinsertion du lithium dans la structure feuilletée du carbone pendant les cycles de charge/décharge. L'électrode positive est constituée d'un oxyde métallique dont le degré d'oxydation est modifié par la réaction chimique pendant la charge/décharge.

L'électrode négative a fait, ces dernières années, l'objet de nombreux travaux aussi bien pour comprendre le mécanisme d'insertion/désinsertion du lithium pendant le cycle de charge/décharge que pour développer de nouveaux matériaux à base de carbone plus performants électrochimiquement que le graphite. A titre d'exemple, les matériaux pour électrode négative de batteries lithium-ion de type intermétalliques (formule générale MX<sub>n</sub>, avec M : Ni, Fe, Co., et X : Sn, Sb, P), sont très étudiés en raison de leur capacité de stockage électrochimique théorique bien supérieure à celle du graphite utilisé commercialement. En 2014, un composite carbone/étain innovant a été mis au point par des équipes françaises membres du réseau RS2E<sup>2</sup> utilisant un procédé simple et respectueux de l'environnement. La solution innovante proposée repose sur le confinement de particules SnO<sub>2</sub> de taille nanométrique (env. 2nm) dans les pores interconnectés d'une matrice carbonée. Cette dernière a été synthétisée par un procédé simple

utilisant des précurseurs carbonés respectueux de l'environnement. Ce matériau présente des performances remarquables : une capacité élevée à stocker de l'énergie, un rendement faradique proche de 100% et une très bonne tenue lors des cycles de charge/décharge. Il a été ainsi montré, pour la première fois, que ce confinement est le paramètre responsable de ces excellentes performances.<sup>3</sup>

Depuis peu, nous vivons une nouvelle révolution technologique avec le développement des batteries Na-ion. Le sodium remplace ainsi le lithium qui reste un élément coûteux, d'abondance limitée et dont l'extraction présente un lourd impact environnemental. Le sodium est quant à lui plus abondant et son exploitation moins coûteuse. Des chercheurs ont donc conjugué leurs efforts pour revisiter les batteries au sodium à l'aune du savoir-faire acquis dans la chimie du lithium.<sup>4</sup>

Pour les supercondensateurs, l'énergie est stockée directement sous la forme d'un champ électrostatique. Ce champ va permettre aux ions de se déplacer vers la surface des électrodes et de s'adsorber et se désorber sans aucune réaction chimique. L'électrode doit ainsi avoir une très grande surface spécifique pour adsorber une grande quantité d'ions et conduire à une bonne capacité de stockage. Les matériaux carbonés de type carbones activés très poreux sont les meilleurs candidats et sont aujourd'hui utilisés dans les systèmes commerciaux. Tout comme pour les batteries, de nombreux matériaux ont été testés en utilisant le carbone seul (graphène, carbone à porosité contrôlée, nanotubes de carbone) ou associé à d'autres éléments (MnO<sub>2</sub>, VnO<sub>2</sub>...). Ces deux dernières années, des sociétés telles que Maxwell Technologies, Sketon Technologies, CSR Zhuzhou Electric Locomotive ont développé des supercondensateurs atteignant des densités d'énergie jamais égalées. Cette dernière compagnie a commercialisé des supercondensateurs à capacité élevée à base de graphite et carbone activé pour alimenter des trolleybus électriques



en Chine. Un tel trolleybus devrait être capable de parcourir 10 km après une recharge d'une minute.<sup>5</sup> La Chine pourrait ainsi économiser 584 GWh d'électricité pour éviter l'émission de 6,7 millions de tonnes de dioxyde de carbone si tous les autobus nouvellement ajoutés (environ 60,000/an) utilisaient ces nouveaux supercondensateurs. Début 2016, des chercheurs français ont mis au point un micro-supercondensateur sur puce électronique performant et industrialisable. L'utilisation massive des supercondensateurs dans l'électronique portable est donc peut-être pour bientôt.<sup>6</sup>

Les équipes françaises, très reconnues à l'international dans ce domaine, ont souvent été à l'origine de travaux pionniers pour le développement de ces deux systèmes de stockage. Des progrès considérables ont été réalisés par ces équipes sur la compréhension des mécanismes de stockage électrochimique dans les batteries et supercondensateurs. En particulier, les effets des caractéristiques du carbone (structure à l'échelle atomique, chimie de surface, porosité) sur les performances finales du système ont été mises en évidence expérimentalement. Pour les batteries, les mécanismes d'insertion/désinsertion du lithium ont été corrélés aux caractéristiques du graphite de l'électrode, apportant ainsi à l'industriel des connaissances indispensables pour sélectionner le matériau le plus performant. Pour les supercondensateurs, des techniques de caractérisation très pointues ont été récemment mises au point pour suivre l'adsorption/désorption des ions dans la porosité des carbones et comprendre les facteurs limitatifs devant être surpassés pour l'obtention de supercondensateurs à plus forte densité d'énergie. Il a notamment été montré qu'il fallait des carbones ayant une porosité inférieure à 1 nm pour être performants.<sup>7</sup>

Tous ces exemples soulignent à quel point les matériaux carbonés ou à base de carbone sont stratégiques pour le développement de dispositifs de stockage électrochimique de l'énergie.

# Les matériaux issus du carbone



## Un matériau hautement stratégique pour l'industrie aéronautique, aérospatiale et automobile

Pour les applications dans ces secteurs industriels, le carbone sera utilisé sous forme de fibres, tissus et matériaux composites. Les fibres de carbone sont des fibres à hautes caractéristiques mécaniques dont la résistance dépasse celle des meilleurs aciers avec l'avantage d'une densité quatre fois plus faible et d'une très bonne conduction thermique et électrique. Les composites à base de fibres de carbone répondent ainsi à la demande forte de produits légers conduisant à une réduction de la consommation de carburant, une diminution des émissions de gaz à effet de serre, une réduction de la consommation des matières.

Les fibres de carbone sont fabriquées à partir de polyacrylonitrile (PAN). Elles sont ensuite tissées pour en faire des tissus de différentes propriétés qui serviront comme renfort pour élaborer des composites à matrice organique ou à matrice céramique.

La demande en fibres de carbone devrait dépasser 100 000 tonnes/an en 2020 soit 36 milliards de dollars pour une capacité de production de plus de 170 000 tonnes en 2020. La demande provient à 16 % de l'aéronautique, 62 % des autres secteurs de l'industrie et 22 % du secteur de la consommation.

Le marché de l'aéronautique civile et militaire demeure l'application la plus importante pour la fibre de carbone. Les composites constitués

de carbone représentent actuellement plus de la moitié de la structure des avions les plus récents comme l'Airbus 350 et le Boeing 787, y compris les ailes et les fuselages. Et la part de marché des composites va continuer à grossir dans les prochaines années avec l'arrivée de nouveaux modèles comme le Boeing 777X dont les nouvelles ailes de 72 mètres d'envergure constitueront la plus grande pièce jamais fabriquée en composite. Jusqu'à une date récente, les excellentes propriétés des composites à matrice de carbone ne pouvaient être mises à profit que dans des marchés de haute technologie ou des marchés de niche compte-tenu du prix élevé. Des évolutions techniques dans la fabrication des fibres et le développement de nouveaux précurseurs tendent à réduire significativement le prix des fibres et par conséquent favorisent l'ouverture vers de nouveaux marchés parmi lesquels l'automobile.

Les prédictions prévoient 2.5 milliards de véhicules dans le monde en 2050. Le défi écologique est important, d'autant plus que la réglementation vise à réduire drastiquement les émissions pour atteindre, en 2020, 0,095 kg par kilomètre parcouru. Atteindre cet objectif nécessite de gagner 200 kg/véhicule à l'horizon 2020, faisant des composites à fibres de carbone un candidat idéal d'allègement. Il est ainsi possible de gagner, respectivement, 50 à 60% et 30% en poids en remplaçant l'acier des véhicules électriques et l'aluminium par des composites

à fibres de carbone. Sachant qu'un gain de 10% en masse permet de gagner 7% en consommation, le défi technologique est indéniablement de taille. Une première étape vient d'être franchie avec la sortie de la BMWi. Voiture de tourisme tout électrique à quatre portes avec une cellule passager en composite carbone, elle sera produite à 30 000 unités par an. Il s'agit là d'une étape décisive dans le processus d'introduction durable des composites renforcés de carbone dans l'automobile.

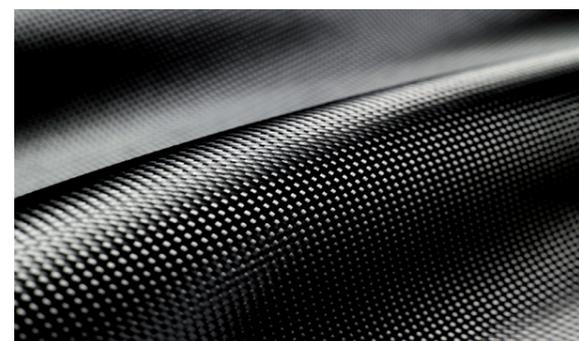
Le secteur de l'éolien devrait également être d'ici 2020 à l'origine d'une croissance de plus de 16 % du marché des composites à base de fibres de carbone.

Les composites à fibres de carbone ont donc encore un bel avenir devant eux !

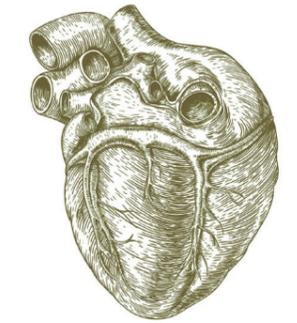
- 1/ <http://www.cnrs.fr/cnrsinnovation-lalettre/actus.php?numero=444>
- 2/ RS2E : réseau pour le stockage électrochimique de l'énergie, structure CNRS pilotée par J.M. Tarascon, membre de l'Institut. Véritable fer de lance français dans ce domaine, ce réseau fédère en son sein 17 laboratoires français, 3 centres de transfert de technologies et 13 industriels. Sa dernière histoire à succès : le développement du premier prototype de batterie Na-ion qui a conduit à la création d'une start-up.
- 3/ [http://www.cnrs.fr/inc/communication/direct\\_labos/vix.html](http://www.cnrs.fr/inc/communication/direct_labos/vix.html).
- 4/ <https://lejournal.cnrs.fr/articles/batterie-sodium-ion-une-revolution-en-marche>.
- 5/ Cf le colloque « Le stockage de l'énergie pour la mobilité contemporaine » organisé par l'ALS à Nancy le 22 mai 2017.
- 6/ <http://www.supercondensateur.com/micro-supercondensateur-sur-puce-electronique-performant-industrialisable>
- 7/ <http://www2.cnrs.fr/presse/communique/931.htm>

## CONCLUSION

Les matériaux carbonés sont certes connus et utilisés par l'homme depuis des siècles mais ils ne cessent d'être source d'innovation. Les exemples cités ci-dessus soulignent à quel point ils jouent un rôle majeur dans des secteurs applicatifs stratégiques comme l'énergie et le transport. Les progrès technologiques restent ainsi intimement liés à notre capacité de produire de nouveaux matériaux ou d'optimiser ceux qui sont déjà sur le marché, de maîtriser des procédés d'élaboration respectueux de l'environnement et de faire progresser les connaissances sur les caractéristiques et les propriétés macroscopiques de ces matériaux.



# La simulation numérique et le matériau vivant



Richard Kouitat Njiwa, Institut Jean Lamour, Nancy

Enseignant-chercheur de l'Université de Lorraine, il est un spécialiste de la mécanique des matériaux qu'il applique à la description et à la prédiction du comportement de tissus vivants.

**Il y a longtemps que des scientifiques s'efforcent d'exprimer sous forme mathématique les lois gouvernant les processus naturels. Les solutions de ces modélisations mathématiques permettent d'explorer le modèle établi, de faire des prévisions ou d'envisager divers scénarios futurs ; autrement dit d'effectuer des expérimentations numériques quantitatives et prédictives.**

La simulation numérique permet de surmonter des difficultés liées à la complexité du modèle mathématique. Son apport dans de nombreux domaines, y compris la science des matériaux, n'est plus à démontrer. En effet, elle permet entre autres d'établir des procédés d'obtention de nouveaux matériaux. Le succès de cette démarche est conditionné par la qualité et la finesse des modélisations des mécanismes gouvernant les processus étudiés. Ces mécanismes sont relativement bien maîtrisés dans le cas des milieux inertes et mobilisent l'attention de chercheurs de divers horizons en ce qui concerne les milieux vivants. S'agissant de l'humain, les objectifs de la simulation numérique sont nombreux et concernent les domaines du diagnostic, de la thérapie, des bio-substituts ou de la chirurgie. En plus d'être le siège de phénomènes d'échanges et de mécanismes d'évolution complexes, le matériau vivant est hétérogène, multi-échelles (très souvent imbriquées) et répond à des stimuli sur différentes échelles de temps. Ces caractéristiques soulignent les difficultés à surmonter pour modéliser finement les milieux vivants. Toutefois, avec un niveau de raffinement plus ou moins élevé, il existe des modèles et simulations numériques pour les milieux vivants. Ces simulations couvrent un large champ partant de la croissance embryonnaire à l'étude de phénomènes physiologiques particuliers d'un organe.

Focalisons-nous par exemple sur la problématique de l'infarctus ischémique. Dans cette pathologie cardiaque, une zone plus ou moins large de l'organe n'est plus irriguée. Sur le plan fonctionnel (clinique), on note une baisse de la fraction d'éjection du ventricule gauche qui s'accompagne de modifications géométriques de l'organe (amincissement de la paroi, augmentation du volume de la cavité, etc.). La recherche d'une thérapie optimale nécessite de comprendre profondément les processus conduisant aux modifications fonctionnelles et structurales observées. Conférant au tissu cardiaque un modèle de comportement de matériau inerte associé à une loi de croissance et de remodelage gouvernée par le niveau de contrainte, des simulations numériques ont permis de montrer par exemple que l'ablation de la zone nécrosée ne modifie pas nécessairement la force gouvernant les processus de modifications structurales. Ce constat est conforme aux observations cliniques. Une autre vision conceptuelle consiste à considérer que dans une structure vivante, il existe un mouvement local indépendant du mouvement macroscopique d'ensemble. Une zone nécrosée est alors vue comme une collection de points inertes (n'ayant plus de mouvement propre). Une simulation numérique dédiée permet de montrer qu'avec cette approche on simule bien la perte de fraction d'éjection et sa sévérité en fonction de la localisation de l'infarctus. On montre également que la déformabilité d'une plus large zone est affectée, induisant probablement le processus de remodelage observé. Cette approche conceptuelle, couplée à des modèles mathématiques de lois d'évolutions biologiques et des simulations numériques dédiées (voir figure), est susceptible de conduire à terme à la mise au point de protocoles thérapeutiques innovants.

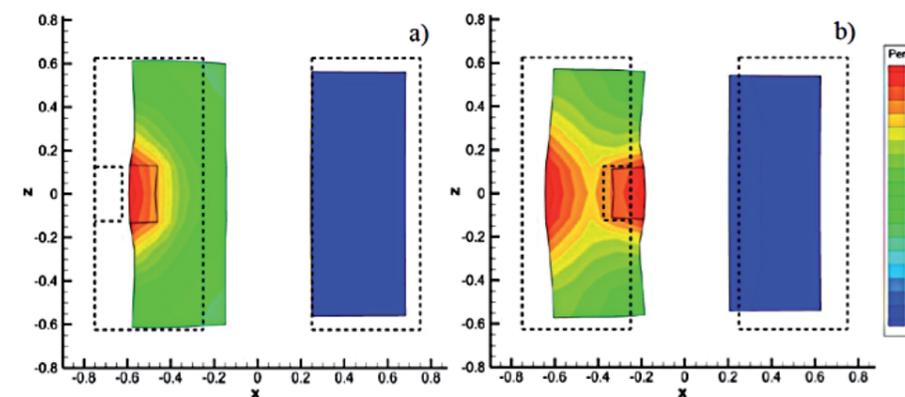


Figure : Déformation d'un tube en présence d'une zone nécrosée sous l'action d'une pression interne.

En pointillé : géométrie avant chargement avec localisation de la zone nécrosée.

En couleurs : géométrie déformée avec iso-valeurs de pourcentage de perte de déformabilité. Plus la valeur est élevée, plus la région est affectée par la présence de la nécrose :

a) zone nécrosée proche de la paroi externe, b) zone nécrosée proche de la paroi interne. Initialement, l'axe du tube est vertical et passe à la position x = 0.

# Les matériaux et le vivant



**Alain Celzard, F. Cleymand, R. Kouitat et V. Fierro,**  
Institut Jean Lamour,  
Epinal et Nancy

*Alain Celzard est professeur à l'Université de Lorraine, membre honoraire de l'Institut Universitaire de France et sociétaire de l'ALS. Il a fondé sur le Campus Bois d'Epinal une équipe de recherche de l'Institut Jean Lamour qui travaille principalement à préparer de nouveaux matériaux dérivés de ressources naturelles.*

Le titre de ce chapitre peut, de prime abord, paraître quelque peu insolite. On imagine en effet d'un côté les matériaux, substances solides définitivement inertes, habituellement durables et dépourvues d'intention, et de l'autre le vivant en général, auquel on associe volontiers les concepts de complexité, d'évolutivité, et aussi de mortalité. Pourtant, à bien y regarder, les matériaux et les êtres vivants se côtoient depuis que la vie existe et se façonnent mutuellement.

Le vivant est en effet capable de sélectionner les matériaux naturels qui lui sont utiles, ou d'en créer de nouveaux plus à son avantage en puisant dans les ressources naturelles et en les transformant. En fin de vie, les êtres qui ont su inventer de nouvelles matières en deviennent eux-mêmes la source en se faisant inertes, produisant ainsi des dépôts géologiques capables de bouleverser les paysages à l'échelle de millions d'années ou en fournissant immédiatement des matériaux à d'autres êtres vivants.

En effet, un matériau servant par définition à une fonction – et par conséquent ne pouvant pas être choisi au hasard – l'Homme a su dès les origines trouver dans la nature les matériaux dont il avait besoin, dont plusieurs d'entre eux directement tirés du vivant et restés longtemps irremplaçables : bois, ramures et cornes, os, nacre, cuir. Récemment, l'observation approfondie de l'organisation du vivant a conduit à une nouvelle discipline : le biomimétisme. La sélection naturelle opérée par le vivant pendant des millions d'années a en effet conduit à des matériaux ultra-performants dont il est devenu possible de s'inspirer soit en reproduisant les architectures aux différentes échelles, soit en imitant leurs voies de synthèse économes en matière et en énergie, soit en s'inspirant des écosystèmes. L'Homme, s'auto-réparant, s'est mis à rechercher tant des substituts qu'il doit bien tolérer que des matériaux qui puissent



servir de support à la croissance de ses propres cellules, ou des vecteurs qui soient capables de délivrer des substances actives au plus près des organes malades et avec le moins d'effets secondaires possibles. Ce qui semblait donc initialement être une association étrange : les matériaux et le vivant, apparaît désormais comme un champ de recherches, de découvertes et d'inspiration immense. On peut en première approximation le diviser en trois grands thèmes, non exclusifs mutuellement, et aux frontières mal définies : les matériaux dérivés du vivant, les matériaux pour le vivant, et les matériaux vivants. Ils font l'objet des trois sections suivantes. Étant donné le nombre considérable de matériaux et d'applications concernés, et la taille nécessairement limitée de ce chapitre, les aspects traités ici couvriront donc surtout, et sans prétendre à l'exhaustivité, les recherches poursuivies en région Grand Est.



Ouate de cellulose



Torchis



Laine de mouton

## MATÉRIAUX DÉRIVÉS DU VIVANT

On entend sous cette terminologie la grande famille des matériaux biosourcés. Ce terme est actuellement très en vogue dans le domaine de la construction, et regroupe tous les matériaux renouvelables pour le bâtiment, qu'ils soient structuraux (bois d'œuvre, panneaux, poutres en lamellé-collé, ...) ou fonctionnels (bardages, isolants thermiques et phoniques sous diverses présentations, vrac ou mats, par exemple). Majoritairement d'origine végétale (bois et dérivés, ouate de cellulose, liège, mais aussi fibres telles que lin, chanvre, paille, miscanthus, ...), mais pas seulement (laine de mouton, plumes de canard, ...), on les retrouve également sous le terme générique d'« écomatériaux ». Ils peuvent être utilisés seuls ou en association avec d'autres matériaux artificiels (bétons dits végétaux, en particulier béton de chanvre), ou synthétiques (polymères industriels classiques chargés en bois et autres fibres naturelles). La plupart des matériaux cités plus haut sont désormais concurrents des solutions constructives traditionnelles. Même s'ils sont en développement rapide, ou font l'objet d'une redécouverte pour d'autres (construction en paille ou en torchis), ils souffrent encore d'un manque de structuration de leur filière, d'un recul insuffisant sur leurs performances à long terme, d'un coût pas encore vraiment compétitif, voire de l'absence des certifications nécessaires dans certains cas. Néanmoins, le côté écologique et sain apporté au bâtiment par ces matériaux assurera leur essor à terme, porté par le besoin actuel de réaliser des économies d'énergie et de stocker du carbone au travers de la rénovation du bâti ancien et de l'éco-construction.

Au vu des tonnages attendus, la construction est sans conteste à l'heure actuelle la branche industrielle qui « tire » la filière biosourcée. Mais « matériau biosourcé » suppose également, à une échelle plus modeste, de pouvoir remplir la même fonction qu'un matériau synthétique à rapport performances/coût sensiblement équivalent. Dans cet esprit, et dans le contexte présent de raréfaction des ressources non renouvelables, il est nécessaire de produire à partir de la biomasse des matériaux fonctionnels capables de remplacer ceux du quotidien, principalement des polymères, des carbones de spécialité, ... Cette tendance mondiale se concrétise par de très nombreux travaux en génie des procédés et en catalyse, par lesquels la biomasse est déconstruite non seulement en ses constituants primaires mais surtout en synthons ou briques de base, à partir desquels de nouveaux matériaux peuvent être préparés. Dans quelques cas privilégiés, les substituts naturels à des réactifs usuels de la chimie existent déjà et ne demandent qu'à être extraits du règne vivant. C'est le cas de très nombreux polyphénols végétaux, composés furaniques et sucres simples ou complexes qui, associés ou non à des protéines, peuvent être à la base d'une grande variété de matériaux aux multiples applications. Ce sont par exemple, et d'une manière non limitative, des résines qui se déclinent en adhésifs, matrices de composites, gels et dérivés (dont des aérogels organiques), monolithes poreux à structure hiérarchisée ou non, mousses rigides, filaments et fils, poudres et films. Si ces résines sont ensuite soumises à un traitement thermique dans des conditions bien contrôlées, de nouvelles familles de matériaux apparaissent : nanoparticules

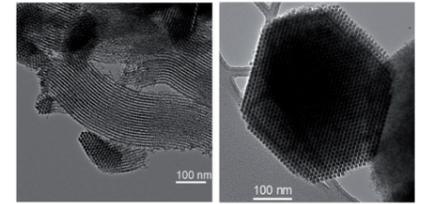


Figure 1 : Carbones mésoporeux ordonnés dérivés d'acide gallique (extrait végétal) pour le stockage électrochimique de l'énergie.

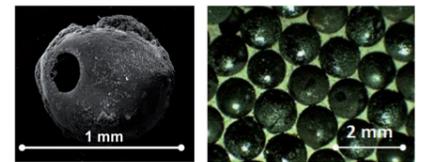


Figure 2 : Sphères de carbone creuses dérivées d'œufs de poisson et de tannin (extrait végétal) pour applications électromagnétiques dans le domaine des GHz.

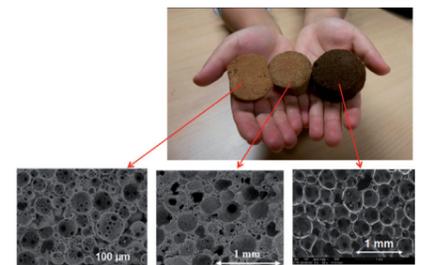


Figure 3 : Monolithes poreux dérivés de polyphénols végétaux obtenus par polymérisation d'émulsions (à gauche), d'émulsions aérées (au centre), et de mousses liquides (à droite) pour la catalyse enzymatique, l'absorption des chocs, ou l'isolation thermique ou acoustique.

carbonées, carbones mésoporeux ordonnés, charbons actifs, carbones hydrothermaux, carbones vitreux (biocompatibles), fibres de carbone, composites voire céramiques. La liste des applications est immense : isolation thermique ou phonique, transfert de chaleur, stockage ou séparation de gaz, stockage et conversion d'énergie, catalyse hétérogène, purification de l'air et de l'eau, manipulation des ondes électromagnétiques, inhibition de la corrosion, domaine biomédical, etc. Trois exemples de matériaux dérivés du vivant sont présentés sur les figures 1 à 3. Dans d'autres cas, les matériaux sont produits par des arthropodes (chitine et dérivés) ou par le métabolisme d'êtres vivants tels que les polymères obtenus par fermentation bactérienne. Ces derniers (l'acide polylactique (PLA), les polyhydroxycarboates (PHA), etc.) sont alors non seulement biosourcés mais aussi le plus souvent biodégradables et biocompatibles, avec des applications en tant que biomatériaux.

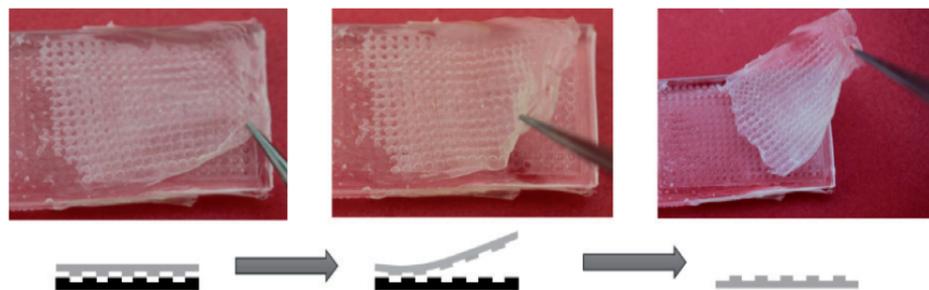


Figure 4 : Membranes multicouches utilisées comme tissu artificiel régénératif.

## MATÉRIAUX POUR LE VIVANT

**Les matériaux pour le vivant sont des matériaux non vivants (métaux et alliages, céramiques, polymères, composites), qui sont ou seront utilisés dans un appareil médical et conçus pour interagir avec des systèmes biologiques.**

Ces matériaux peuvent participer à la constitution d'un dispositif à visée thérapeutique, chirurgicale, diagnostique ou de stockage ou à celle d'un substitut de tissu ou d'organe ou encore à celle d'un dispositif de suppléance (ou d'assistance) fonctionnelle. Cette catégorie de matériaux, que l'on nomme de façon générique « biomatériaux », comprend l'ensemble des matériaux et des substances pharmacologiquement inertes d'origine naturelle ou de synthèse, qu'ils soient solubles ou insolubles, dégradables ou non. Ils représentent donc une classe particulière de matériaux utilisés sous contrainte biologique et devant, de ce fait, induire une réponse appropriée de l'hôte dans une application spécifique, c'est-à-dire devant être biocompatibles.

L'Homme a depuis longtemps utilisé la nature comme une réserve de matières premières, en particulier pour des applications en santé, d'abord pour se nourrir puis se soigner, et enfin pour remplacer un organe ou une fonction. On retrouve des dispositifs de suppléance ou de remplacement inactifs biologiquement de plus de 4000 ans comme des pieds artificiels en bois ou des implants dentaires en fragments de nacre de l'huître *Pinctada Maxima* (chez les Mayas). Avec l'évolution des technologies, l'or (en dentisterie, VII<sup>ème</sup> siècle avant JC), l'acier (prothèse datant de la seconde guerre punique), puis les polymères (le polyméthyl méthacrylate ou PMMA, seconde guerre mondiale) ont été utilisés en tant que biomatériaux de synthèse. L'évolution actuelle de l'innovation sur les biomatériaux consiste, selon Aberkane,<sup>1</sup> à s'inspirer de la nature en la considérant comme « une biblio-

thèque », ouvrant la voie vers l'innovation par le biomimétisme, véritable discipline scientifique et technologique intégrée dans la loi sur la biodiversité (Loi n° 2016-1087 du 8 août 2016).

De façon générale, avec une compréhension croissante des processus biologiques, le développement de nouvelles possibilités en science des matériaux et de nouvelles exigences en médecine, ces biomatériaux (qu'ils soient biomimétiques ou non) sont progressivement passés de bio-inertes (inactifs biologiquement) à bioactifs (biologiquement actifs) puis bio-résorbables (ou biodégradables). Une rupture épistémologique dans l'ingénierie des biomatériaux est intervenue dans les années 1990-2000 lorsque l'idée est venue d'associer ces biomatériaux à des cellules. Ces cellules peuvent provenir de différentes sources (autologues, allogéniques, xénogéniques) et être de différents types (cellules souches, cellules différenciées, ...) afin de restaurer et/ou remplacer des tissus ou des organes endommagés par un traumatisme, une maladie ou des anomalies génétiques et pour leur permettre de retrouver leurs activités. Une nouvelle discipline a alors vu le jour : l'ingénierie tissulaire, une composante de la médecine régénérative. Dans ce cas, les biomatériaux utilisés en tant que matrices de support doivent assurer deux fonctions principales : (i) diriger l'organisation, la croissance et la différenciation des cellules, en apportant un support physique et des signaux chimiques ; et/ou (ii) assurer un environnement idéal aux cellules sélectionnées (Figure 4).

La régénération de tissu ou d'organe est alors favorisée par l'utilisation de cellules in vitro. Leur prolifération et leur différenciation sont donc nécessairement à étudier et contrôler. De même, la compréhension fine des réponses mécaniques et biologiques des biomatériaux en fonction, d'une part de leurs propriétés physico-chimiques de surface, et d'autre part de leur architecture

tridimensionnelle est nécessaire pour la conception de matrices fonctionnelles et innovantes. Les aspects biomécaniques sont aussi importants à prendre en compte tout comme l'étude des propriétés des tissus originaux, l'identification des propriétés minimales requises pour assurer la fonction, la caractérisation des signaux mécaniques régulant les tissus fabriqués, ou l'efficacité et la sécurité des tissus fabriqués. La région Grand Est est l'une des régions de France où ces thématiques sont bien représentées à la fois dans les structures de recherche mais aussi dans des structures de transfert de technologie et/ou des PME.

Il est important, ici, de souligner que les biomatériaux ne sont pas uniquement des matériaux massifs. Ils existent sous différentes formes telles que des revêtements, des gels, des membranes, des capsules, des nanoparticules, des fibres, etc. Pour ne citer qu'un exemple, des nanosystèmes d'administration, de transport et d'adressage des médicaments ont pu être conçus grâce à des recherches menées à l'interface de la physique, de la chimie et de la biologie et ont conduit ces dernières années à des progrès importants concernant :

- ▶ le développement de nouveaux biomatériaux biocompatibles et fonctionnalisés,
- ▶ la conception de nouvelles architectures supra-moléculaires organisées,
- ▶ la maîtrise de certains procédés d'encapsulation,
- ▶ l'identification des cibles biologiques.

Aujourd'hui près de 50 000 matériaux (naturels et synthétiques) et 200 procédés de mise en forme sont disponibles. Il apparaît donc possible de proposer de nouvelles pistes pour la conception maîtrisée et sécurisée de biomatériaux plus performants, de morphologie et de structure variées qui pourraient permettre l'émergence de nouvelles technologies et de nouveaux concepts.

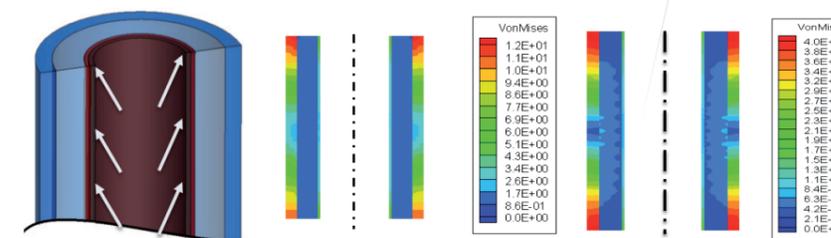


Figure 5 : Simulation sur ordinateur des contraintes induites dans les diverses couches d'une artère (à gauche) par une pression interne. L'image au centre montre les trois milieux constitutifs de l'artère lorsqu'ils sont soumis à une micro-dilatation. L'effet d'une couche rigide représentant un 'stent' est montré sur la simulation de droite. Un autre exemple de simulation d'un matériau vivant est l'objet de l'encart de Richard Kouitak, page 39.

## MATÉRIAUX VIVANTS

**Adapter sa morphologie à son environnement, continuer à évoluer malgré les agressions extérieures, telles sont quelques-unes des caractéristiques propres aux systèmes vivants. Intuitivement, on conçoit aisément la notion de matériau vivant. Qu'il soit d'origine végétale ou animale, il répond activement à des stimuli biophysiques / chimiques agissant sur différentes échelles de temps.**

Son élément constitutif, le tissu vivant, a une composition et une organisation structurale complexes mais optimales pour conférer à l'organe dont il est issu des propriétés essentielles pour la fonction physiologique. Il n'est pas aisé de reproduire ces propriétés particulières par assemblage de matériaux synthétiques, notamment par biomimétisme.

La compréhension profonde des mécanismes conférant au tissu vivant ses remarquables propriétés est primordiale pour la mise au point de thérapies efficaces, de certaines techniques chirurgicales, pour la fabrication de bio-prothèses, etc. Ces mécanismes sont plus ou moins bien maîtrisés et sont pour bon nombre d'entre eux fortement régis par les lois de la mécanique. En effet, l'une des premières applications de la mécanique au domaine de la biologie semble être due à Aristote (384 – 322 avant J.C.) qui présenta une remarquable analyse du mouvement péristaltique de l'urètre dans le transport de l'urine du rein à la vessie. Les nombreuses interventions de la mécanique dans le domaine de la biologie ont conduit à l'émergence du champ scientifique connu sous la dénomination de biomécanique. La plupart des travaux menés dans ce cadre considèrent le milieu vivant comme un matériau inerte doté d'une microstructure particulière. C'est une approche pertinente pour de nombreuses applications qui permet entre autres d'améliorer les caractéristiques des bio-prothèses ou de construire des modèles d'organes virtuels à intégrer dans des simulateurs chirurgicaux. Ces outils d'apprentissage du geste chirurgical

seront à l'avenir incontournables dans la formation du chirurgien et sont d'ores et déjà utilisés à Nancy dans le cadre de l'Hôpital Virtuel de Lorraine.<sup>2</sup> À ce jour, ces outils de formation de premier plan ne sont pas suffisamment réalistes pour permettre un apprentissage poussé du geste chirurgical. L'amélioration de ces dispositifs repose en partie sur l'intégration de modèles plus réalistes du tissu vivant et de son aptitude à se déformer au contact de l'instrument chirurgical.

Dans une autre approche de modélisation du tissu vivant, on s'efforce de prédire les évolutions de la structure et des constituants biologiques sous l'action de stimuli biophysiques (Figure 5). Cette démarche en pleine expansion est connue sous la dénomination de mécanobiologie et intègre des aspects tels que la morphomécanique. Les travaux menés dans ce dernier cadre sont liés aux processus de croissance (qui trouvent des applications directes en cancérologie), au remodelage (variation des propriétés du matériau), et à la morphogénèse.

La qualification du comportement du tissu vivant et les modélisations mathématiques des diverses évolutions associées mobilisent de nombreux chercheurs. Les résultats de ces travaux ont des applications immédiates sur le plan clinique et industriel. Elles offrent également des perspectives pour de nouvelles pratiques thérapeutiques et de nouvelles stratégies d'apprentissage chirurgical.

## CONCLUSION

En définitive, l'adjectif « vivant » peut revêtir plusieurs significations. Attribué à des matériaux, il évoque souvent le fait que ces derniers peuvent, au cours de leur cycle de vie et de leurs interactions avec le milieu extérieur, vieillir et présenter des pathologies que l'on peut prévenir par de bonnes pratiques. La « mort » du matériau peut alors être évitée ou au moins significativement retardée et/ou avec gestion optimisée des résidus en fin de vie. Il en va ainsi du bois et du béton, par exemple. Mais si le bois, matériau rêvé pour l'ingénieur qui permet à des arbres d'atteindre parfois 100 m de hauteur avec une si faible densité, est bien vivant avant que la plante ne soit coupée, d'autres le sont tout aussi réellement et font partie intégrante des systèmes biologiques animaux, à commencer par nous-mêmes. La connaissance des matériaux dont l'Homme est constitué, qu'il s'agisse de tissus durs tels que l'os ou de tissus mous tels que le myocarde, est nécessaire dès lorsqu'une lésion doit être traitée. Mais ce court chapitre a aussi montré, en n'en survolant que quelques aspects, que des matériaux peuvent être qualifiés de « bio » non pas en raison de leur origine biosourcée, mais pour leur vocation à être en contact avec le vivant. Selon les cas, on souhaite que ces matériaux soient bio-inertes, ou au contraire bio-actifs. Ils ne sont pas nécessairement biosourcés mais peuvent, bien au contraire, être artificiels du moment qu'ils peuvent se substituer à du matériau vivant, en stimuler ou en interdire le développement, ou encore participer à des essais thérapeutiques ou diagnostiques. Ce champ de recherches est extrêmement actif, et ses résultats participeront à l'essor du concept d'« Homme augmenté », suite probable de l'« Homme réparé ». Une telle possibilité passera inévitablement par le développement de systèmes, et donc de matériaux, totalement compatibles avec le vivant.

<sup>1</sup> Idriss J. Aberkane, « Economie de la connaissance », note éditée par la Fondation pour l'Innovation Politique, mai 2015, ISBN 978-2-36408-082-9, 48 pages.

<sup>2</sup> Un hôpital virtuel est le lieu le plus adapté pour l'application de la préconisation « Jamais la première fois sur le patient ». Il englobe des aspects relevant de l'innovation pédagogique et d'une recherche nécessairement transverse. En effet, à l'aide de simulateurs spécifiquement dédiés, reproduisant au mieux le patient physique ou numérique, on met au point de nouveaux protocoles opératoires et l'on s'exerce sur des pratiques déjà éprouvées, notamment chirurgicales, ou à mettre en œuvre dans des situations difficiles.

# L'économie et les matériaux



**Jean-Louis Pierquin**  
Fonds Européens des Matériaux - Metz

*Il a effectué sa carrière comme cadre dirigeant dans l'industrie à Saint Gobain, Klöckner, et à la direction de l'innovation et de la R&D d'Arcelor. Il a fondé et présidé le Pôle de Compétitivité Materialia, a été à l'initiative de la création de l'IRT M2P et préside aujourd'hui le Comité Consultatif d'Investissement des Fonds Européens des Matériaux.*

Depuis la protohistoire, l'activité de transformation de la matière pour la construction d'objets destinés à de nombreux usages est le signe tangible de la présence de l'homme. Par sa créativité, l'homme a progressivement domestiqué la matière en la faisant matériau.



Les historiens ont utilisé cette spécificité pour caractériser les grandes périodes de développement de l'humanité : âge de pierre, âge du bronze, âge du fer...

Ils ont montré que l'aptitude à utiliser des matériaux par un groupe d'hommes structurerait leur développement grâce à leur possibilité de fabriquer des objets influençant fortement les systèmes productifs (armes, outils agraires, ...). Ils ont modifié les modes de vie (sédentarité, spécialisation de métiers) et ont fait évoluer les relations entre groupes humains (développement du commerce sur des longues distances, augmentation de la conflictualité pour l'accaparement des gisements de matières premières).

L'exercice consistant à qualifier par un nom de matériau les périodes de l'histoire moderne et la période actuelle s'épuise dans des discussions sans fin : plastique, silicium, matière vivante, etc. ? Si la réponse n'a que peu d'importance à nos yeux, ce questionnement montre qu'il y a dans le bon sens collectif la conviction d'une intrication forte entre la maîtrise technique et économique des matériaux et le processus de développement social et économique du monde.

Dans les objets qui nous entourent dans notre vie quotidienne, le nombre de matériaux assemblés dans chacun d'eux pour obtenir les fonctions désirées va croissant : plus de dix matériaux différents dans une poêle à frire moderne, les objets complexes de l'électronique et de l'automobile en rassemblent plusieurs milliers. L'ingénierie des matériaux toujours en évolution

est au cœur de tous nos développements, fussent-ils virtuels. On oublie souvent et trop facilement que l'ensemble de la révolution numérique n'existe que parce que les concepteurs des puces électroniques continuent à en améliorer les performances de puissance par des assemblages nouveaux de matériaux semi-conducteurs. Jusqu'à un passé récent et depuis le début de la révolution industrielle, les acteurs économiques se sont comportés comme si les ressources de matières premières étaient sans limites. Si parfois la localisation géographique de certaines ressources en contraignait l'obtention, les moyens commerciaux, ou parfois militaires, permettaient tôt ou tard de régler le problème...

Depuis les dernières décennies du XX<sup>ème</sup> siècle, les consciences ont beaucoup évolué. La croissance démographique, la volonté légitime de l'amélioration du niveau de vie des populations, la mesure des impacts environnementaux et de l'amenuisement de nombreuses ressources non renouvelables ont modifié d'une façon radicale les façons dont doit être pris en compte, dans une économie à repenser, l'usage des ressources naturelles des matériaux.

Les méthodes de raisonnement économiques sont remises en cause essentiellement en cherchant à intégrer dans le coût des ressources les externalités environnementales et leurs conséquences sociales : elles modifient considérablement l'espace (difficulté de faire la part du local et du global) et l'horizon de temps (voir et prévoir les conséquences à long terme des décisions).

## L'EXPLOSION DE L'EXPLOITATION DES RESSOURCES : VA-T-ON VERS L'EFFONDREMENT ?

L'OCDE différencie six grandes catégories de ressources :

1. La biomasse
2. Le bois
3. Les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz...)
4. Les minéraux pour la construction (sable, graviers, concassé, ...)
5. Les minerais à usage industriel (phosphates, ...)
6. Les minerais et matériaux métalliques.

En 2010, le total de la consommation de ces 6 catégories de ressources s'élevait à 72 milliards de tonnes, ce qui est le double de 1980 et dix fois ce qui était consommé en 1900.

Les consommations qui suivent sont par jour et par habitant dans les pays de l'OCDE qui représentent à eux seuls 60% de la consommation mondiale :

- ▶ 10 kg de biomasse,
- ▶ 18 kg de minéraux de construction et industriels,
- ▶ 13 kg d'énergie fossile,
- ▶ 5 kg de métaux.

La population mondiale de 7 milliards d'habitants en 2010 passera à 9,5 milliards en 2050 et l'activité économique, mesurée en US\$ de PIB, passerait sur la même période de 55 000 milliards de US\$ à 180 000 milliards de US\$, soit 3,3 fois plus (prévisions OCDE).

Cette extrapolation montre que si la consommation de ressources suivait l'évolution du PIB, sans réduction majeure de ressources par point de PIB, la situation serait catastrophique en particulier sur les ressources non-renouvelables (énergies fossiles, métaux, minéraux servant à la construction, etc.) à tel point que cette croissance ne pourrait être atteinte! (Figure 1).

L'amélioration drastique de l'efficacité d'utilisation des ressources non renouvelables est donc un challenge vital pour la survie de l'humanité.

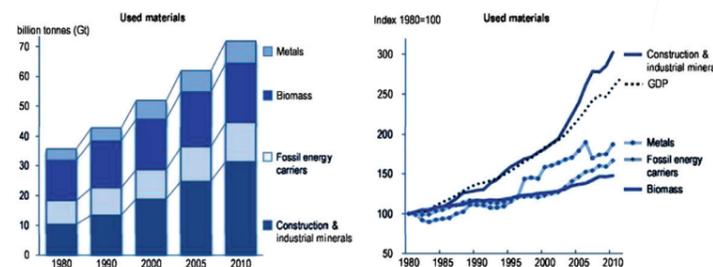


Figure 1 : Evolution de la consommation de ressources naturelles de 1980 à 2010 (monde). D'après la Ref. 1.

Il s'agit donc non seulement de réduire la consommation de ressources par unité produite mais aussi de le faire dans une ampleur suffisante pour assurer la pérennité de l'offre de produits et de services fournissant des conditions décentes de vie à l'ensemble de la population mondiale.

Le découplage de la croissance du PIB et de la population, de la consommation de ressources naturelles et des impacts environnementaux est donc un axe d'action majeur permettant de se prémunir de situations problématiques aux conséquences irréversibles.

Les évolutions passées dans les pays de l'OCDE mettent en évidence un découplage apparent entre 1980 et 2010 des pays de l'OCDE alors que pour le monde ce découplage reste très modéré.

Il faut tempérer quelque peu cette tendance au découplage sur les pays de l'OCDE car les effets de la crise économique ont modifié dès 2006 la consommation de ressources par ralentissement de l'économie, en particulier de l'investissement

(logement, transport et infrastructure), une part grandissante de services, et des délocalisations de fabrication dans les pays hors OCDE.

Malgré ces réserves, les efforts entrepris dans les pays de l'OCDE pour :

- ▶ augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources pour un service rendu équivalent (productivité des ressources),
- ▶ réduire les déchets et les produits non-utilisés à tous les stades de la vie des produits,
- ▶ les politiques de gestion des flux, de réutilisation, de recyclage,
- ▶ le traitement des déchets et l'utilisation des man-made stocks,

ont contribué à une nette amélioration. Certains pays (Figure 2) sont même en découplage total (stagnation de la consommation de ressources avec un PIB croissant) voire (Figure 3) en découplage négatif (décroissance de la consommation de ressources avec un PIB croissant).

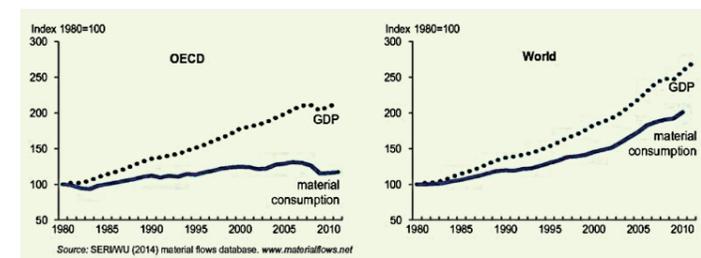


Figure 2 : Découplage entre la croissance du PIB et la consommation de ressources (pays de l'OCDE/monde).

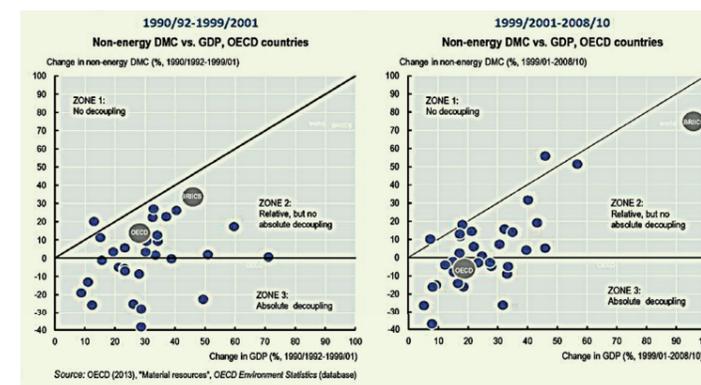
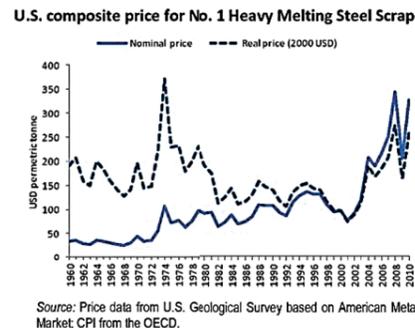
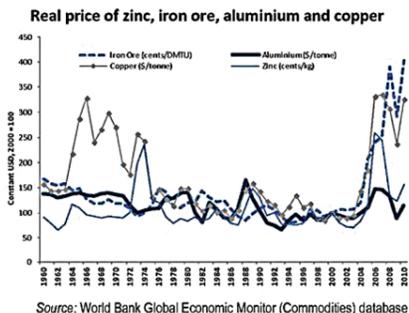


Figure 3 : Découplage entre PIB et consommation de ressources non-énergétiques, comparaison OCDE et BRICS.

**Pays OCDE :** Europe, Australie, Canada, Chili, Israël, Japon, Mexique, Nouvelle Zélande, Corée, USA.

**Pays BRICS :** Brésil, Inde, Indonésie, Chine, Afrique du Sud, Fédération de Russie.

Figure 5 : Evolution du prix de marché de métaux primaires vs prix de marché de la ferraille US.



Tableau

Matériau	Produit primaire*	Produit recyclé*
Acier	3,19	1,1
Aluminium	9,83	0,52
Zinc	2,93	Recyclage inclus
Cuivre	2,93	Recyclage inclus
Nickel	9,17	Recyclage inclus
Plomb	2,09	Recyclage inclus

\* Tonnes de CO<sub>2</sub> par tonne de métal.



Contribution des étapes du cycle de vie des VE et VT de référence pour le potentiel de changement climatique

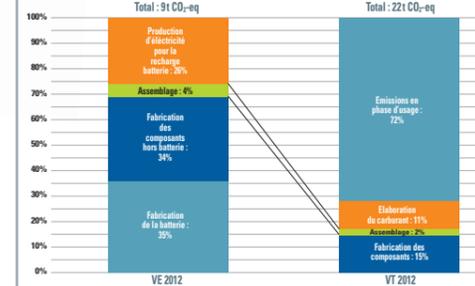


Figure 6 : Comparaison VE (à gauche) et VT (à droite).

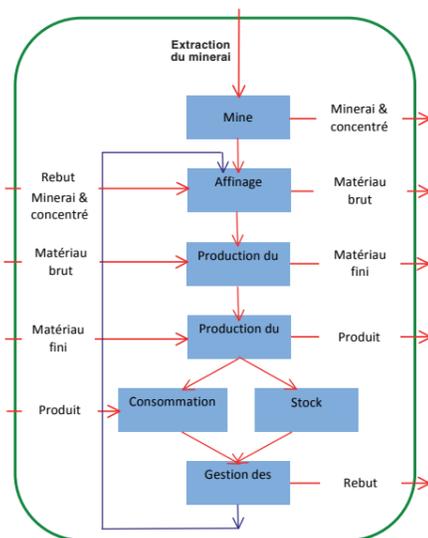


Figure 4 : Schéma conceptuel de l'ACV.

## POUR UNE NOUVELLE APPROCHE DE L'ÉCONOMIE DES MATÉRIAUX

### L'analyse du Cycle de Vie, un outil central

Si les chiffres de la macro-économie donnent une idée des grands enjeux du futur, ils sont inopérants pour le décideur économique qui, en collaboration avec le technicien, a à décider de la pertinence de la création d'un produit en fonction de ses coûts et de son impact sur l'environnement et l'épuisement des ressources.

Le concept d'analyse du cycle de vie (ACV) donne une des clés de cette compréhension et permet d'approcher d'une façon systémique la valeur d'un matériau dans son cycle complet (Figure 4). Cette analyse du cycle de vie nécessite une bonne connaissance des données économiques et environnementales du matériau considéré, mais aussi celles qui dépendent de l'objet (fabrication et usage) dans lequel ce matériau est incorporé. Il est très difficile et même parfois impossible de quantifier puis de valoriser certains éléments de coût. Ceux des impacts environnementaux (externalités) en font partie, le décideur devant souvent se contenter de ratios techniques.

Les lois du marché, même quand elles ne sont pas faussées par des distorsions de la concurrence, comme elles n'intègrent pas ces externalités, ne reflètent au travers des prix qu'incomplètement, et parfois pas du tout, le coût global de telle ou telle solution et ne permettent pas simplement leur comparaison.

Pour illustrer cette complexité à laquelle nous sommes confrontés, nous le ferons pour des ressources naturelles non renouvelables qui sont à la fois économiquement fortement contributives et à impact significatif sur l'environnement que sont les métaux. Nous savons que leur valeur (leur prix) est systématiquement sous-évaluée par une prise en compte insuffisante de leur impact environnemental durant leur vie d'une part et d'autre part, par notre méconnaissance des conséquences réelles de leur rareté croissante. Les prix de marché des métaux bruts sont très volatils et sensibles aux effets de cartels des

producteurs, aux mouvements spéculatifs liés aux stocks intermédiaires, aux investissements dans l'extraction et dans les traitements, aux situations politiques dans les pays miniers (Figure 5). Dans la situation présente cette volatilité rend difficile la rentabilisation de l'exploitation des processus de récupération et de recyclage, d'exploitation des man-made stocks (matériaux récupérables dans les bâtiments, les voitures, les machines, matériels électronique, ...). En effet sur certaines périodes les coûts de collecte et de reconditionnement sont plus élevés que le prix de marché de la ressource directe, dissuadant les opérateurs d'y investir. La liberté du marché joue dans ce cas à l'encontre de l'intérêt collectif, les solutions pour y remédier passent par des systèmes de taxes, de financement de la collecte, d'interdiction des exportations de déchets, etc. Une intervention des états s'impose dans des contraintes sur la gestion des flux.

**Sur le sujet de l'impact environnemental**, le cas du carbone est bien connu (même s'il n'est pas résolu) et amène les gouvernements à des solutions contraignantes pour les pollueurs. Taxe carbone, quotas d'émissions, en renchérissant l'utilisation du carbone fossile, améliorent la rentabilité des investissements de substitution. Ces mesures sont complexes à concevoir et à négocier si on veut conserver des règles d'équité, en particulier ne pas pénaliser trop les économies en retard de développement et ne pas créer de comportements pervers (spéculation sur les permis d'émission de CO<sub>2</sub>, par exemple)

Mais quand on incorpore un métal dans un objet, comment prendre en compte ces impacts environnementaux ? Les scientifiques et les industriels donnent sur la base des chaînes de production et de transformation réelles les différents impacts environnementaux de chacun des métaux exploités. Pour les émissions de CO<sub>2</sub>, avec une certaine incertitude, l'ADEME donne les évaluations suivantes : (voir tableau)

Ces valeurs sont construites sur des valeurs moyennes. Certains de ces matériaux sont comparés aux autres très sensibles aux mix énergétiques utilisés pour les produire. L'acier primaire est fabriqué avec du charbon dans tous les pays, cet indicateur ne disperse que par l'efficacité différentielle des producteurs. Pour la production d'aluminium, celui produit au pied d'un barrage hydraulique canadien (1t CO<sub>2</sub>/t) n'a pas le même impact sur les émissions que l'aluminium chinois produit grâce à de l'électricité venant de centrales à charbon (16t CO<sub>2</sub>/t). Quelle valeur choisir pour le producteur de produit contenant de l'aluminium ? Celle de sa source propre, de son pays, la moyenne mondiale ? Quelle valeur fixer dans les décisions engageant l'intérêt collectif ? Ce tableau fait apparaître aussi l'intérêt du produit recyclé nettement moins émissif dans sa production. Dans ce cas, quelle valeur utiliser ? Sur la base de quel taux de recyclage ?

Les économistes sont tous convaincus que la seule façon de réduire la consommation de ressources non renouvelables ou polluantes est d'augmenter le prix de la ressource primaire par la mise en place de taxes ou de quotas de consommation (et donc d'émission) contraignants de façon à forcer à la substitution.

La solution de l'augmentation des prix par des taxes sur les matériaux a l'avantage de permettre aux acteurs de rentabiliser les investissements de recyclage, de réduction des consommations et de recherche de produits de substitution.

Il est clair que de telles mesures sont difficiles et compliquées à mettre en œuvre, à cause d'une forte opposition non seulement des régions productrices de ces matières qui verraient baisser leur rente de situation, mais aussi des pays les plus pauvres qui devraient financer cet effort par le renchérissement de leur consommation alors qu'ils bénéficient moins que les autres des revenus créés par cette consommation de ressources.

Une autre objection très importante à ce type de solution est que les émissions pour la fabrication des métaux pendant leur vie peuvent être largement compensées par des gains parfois beaucoup plus importants pendant et grâce à leur usage.

### L'usage des métaux

Les incertitudes sur la valeur et les impacts environnementaux des matériaux sont modifiées pendant leur phase d'usage.

On imagine aisément qu'utiliser de l'aluminium en remplacement de l'acier pour alléger un avion se justifie par l'économie d'émission de CO<sub>2</sub> et de carburant lors de son utilisation en vol. De la même façon, un isolant organique comme le polyéthylène expansé dans sa vie d'isolant fait économiser en énergie carbonée pour le chauffage plus qu'il n'en consomme pour être fabriqué.

Pendant leur usage, les métaux interagissent donc directement ou indirectement avec l'environnement. Cette interaction dépend de l'utilisation qui est faite du produit dans lequel ils sont incorporés. Celle-ci peut avoir des conséquences positives ou négatives sur l'environnement dans des proportions qui dépassent largement celles de leur fabrication propre.

Un exemple dans un domaine qui nous semble familier peut nous éclairer sur cette complexité de choix à laquelle nous sommes maintenant soumis.

Faut-il mieux acheter un véhicule électrique ou un véhicule thermique ? L'ADEME a fait une étude<sup>2</sup> pour essayer d'éclairer objectivement ce choix. Nous n'en donnerons que quelques résultats succincts mettant en évidence les difficultés de ces méthodes (le lecteur pourra aisément consulter l'étude complète<sup>2</sup> sur le site de l'ADEME).

La comparaison est faite entre une voiture électrique (VE) et une voiture thermique (VT) de mêmes dimensions et de même usage, dans un contexte franco-allemand identique pour les conditions de fabrication mais différent pour le mix énergétique de production d'électricité (France à majorité nucléaire et Allemagne à majorité carbonée). La durée d'usage du véhicule est supposée être de 150000 km. La batterie choisie est celle d'une technologie Li-Ion disponible actuellement. Nous choisirons (Figure 6) deux indicateurs (l'étude est beaucoup plus complète et comporte d'autres indicateurs) : les émissions de CO<sub>2</sub> en t de CO<sub>2</sub> (responsable du réchauffement climatique) et le potentiel d'acidification de l'atmosphère en kg de SO<sub>2</sub> équivalent (responsable des pluies acides).

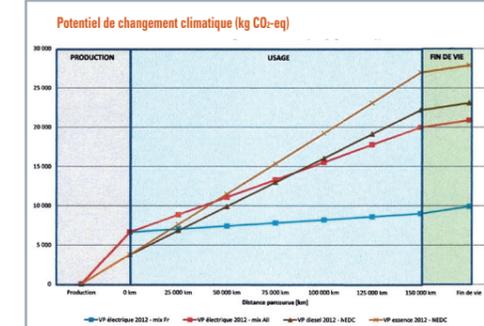


Figure 7 : Comparaison entre VE et VT en fonction de la distance parcourue.

En France, pendant la durée de vie du véhicule (mix de production électrique français à 110 g de CO<sub>2</sub> par kWh), l'émission globale de CO<sub>2</sub> du véhicule électrique est de 9t pour une émission de 22t pour le véhicule essence. Une très forte dissymétrie apparaît dans les proportions des émissions en phase d'usage : 26 % pour le véhicule électrique et 72% pour le véhicule essence. On remarquera aussi que pour produire le véhicule électrique, on émet 6,66t de CO<sub>2</sub> et seulement 3,8t pour le véhicule essence. Cet écart est dû essentiellement à la fabrication des batteries et des métaux qui la composent. Pour l'Allemagne (avec un mix énergétique très différent de la France à 623 g par kWh), les émissions de CO<sub>2</sub> pendant la phase de fabrication des véhicules sont identiques mais pendant la phase d'usage, elles augmentent très significativement. Le véhicule électrique ne devient meilleur que le véhicule essence qu'après 30 000 km et après 75 000 km pour le diesel avec un écart réduit en fin de vie avec le diesel de l'ordre de 10% (Figure 7).

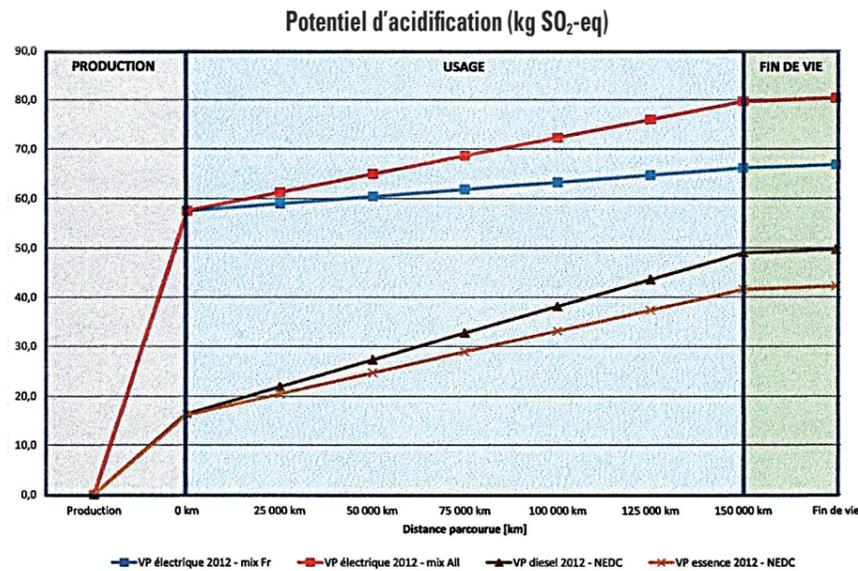


Figure 8 : Potentiel d'acidification des VE et VT en fonction de la distance parcourue.

Si on compare maintenant les véhicules sur leur potentiel d'acidification de l'atmosphère liées aux émissions de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, ..., la comparaison est très largement au détriment des véhicules électriques du fait de la forte émission de SO<sub>2</sub> dans l'extraction des métaux nécessaires à la fabrication des batteries (Figure 8). La production d'acidifiant des véhicules diesel est supérieure de 20 % à celle des véhicules essence, mais celle d'une voiture électrique est au moins 60% plus élevée : idée souvent ignorée de beaucoup de militants anti-diesel ...

Par ce cas particulier, on voit assez clairement que les choix à faire sont multicritères (que privilégier des pluies acides ou du réchauffement climatique ?), conditionnés par d'autres choix qui ne sont pas que techniques (choix du mix énergétique national, évolution des technologies de batterie, etc.). Le coût de construction apparent (et donc le prix de vente) d'un véhicule électrique est plus élevé que celui d'un véhicule à essence. C'est un frein aux ventes de l'électrique malgré son excellente performance dans la lutte contre le réchauffement climatique.

L'intérêt collectif à la substitution n'est pas respecté dans les prix.

L'Etat intervient pour rétablir une hiérarchie adaptée. Il peut le faire potentiellement avec deux moyens :

- l'augmentation par les taxes des carburants carbonés. Le consommateur subit de tels surcoûts avec son véhicule à essence qu'il amortit facilement par son achat d'un véhicule électrique.
- l'Etat donne un bonus ou un malus à l'achat des véhicules en fonction de leur émission. Le système n'a pas de coût pour l'Etat (bonus malus équilibré). Il fait payer les plus polluants au profit des moins polluants. En 2017, le bonus écologique français pour un véhicule tout électrique est de 6 000€, ce qui représente avec les chiffres de CO<sub>2</sub> économisé sur la durée de vie (13 tonnes), un coût d'environ 460 € la tonne de CO<sub>2</sub> ! (on est loin des 30 €/t d'une éventuelle taxe sur les émissions).

Et puis, comment tient-on compte des nuisances du nucléaire (déchets) ?



## CONCLUSION

Les matériaux sont et resteront un moteur très important de notre développement économique. C'est à travers l'innovation tout au long des chaînes industrielles et des systèmes complexes de nos organisations que nous pourrions faire face à ce fantastique challenge qui consiste à remplacer les ressources non-renouvelables par des ressources renouvelables, d'améliorer drastiquement la productivité globale de l'utilisation des matériaux en réduisant l'impact environnemental.

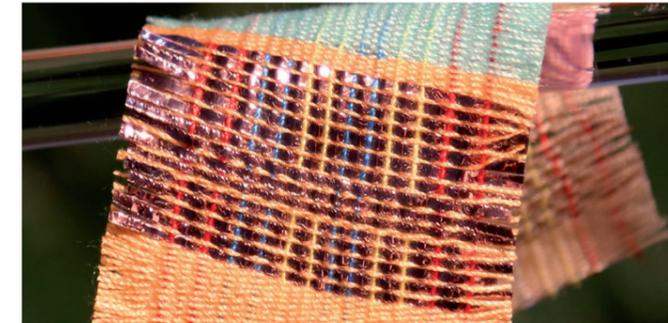
Les données techniques et économiques, les méthodes actuelles d'analyse disponibles sont insuffisantes et ne permettent pas d'optimiser d'une façon fiable les décisions des acteurs. La main invisible ne fonctionne pas. Les coûts cachés n'apparaissent pas. La conséquence est que, dans le secteur des matériaux, les investissements dans la recherche publique et privée, le développement de solutions innovantes dans tous les domaines d'utilisation sont relativement faibles parce que mal valorisés par le marché. Un très gros effort collectif est fait et doit continuer pour améliorer et inventer les outils de l'approche systémique indispensable. La collaboration et la pluridisciplinarité sont de règle : entreprises, consommateurs, institutions de régulation, communautés scientifiques des matériaux, de l'environnement, de l'économie, de la géographie et des sciences humaines. Construire des méthodes de choix prenant en compte ces externalités environnementales est une priorité.

Mettre en place dans notre économie ce nouveau paradigme est sûrement un acte politique, car il modifiera en profondeur nos façons d'utiliser les ressources et de les affecter aux besoins des citoyens.

# Invention et innovation

Cathie Vix, Institut Carnot MICA - Mulhouse.

Directrice de recherche au CNRS, elle a été à l'origine de la réorganisation en Alsace de l'innovation dans le domaine des matériaux. Elle dirige l'Institut Carnot MICA et a reçu en 2016 la médaille de l'Innovation du CNRS.



Exemple de textile collecteur d'énergie pour vêtements connectés. L'incrustation, dans les tissus, d'éléments électroniques permettant de capter et stocker l'énergie environnante

- mouvements, chaleur, solaire - et servant à alimenter divers senseurs et capteurs intégrés, est un domaine de recherche en plein essor avec des innovations quotidiennes!

**L'innovation résulte à la fois d'une nouvelle idée, faisant appel à la créativité, d'une réalisation concrète et de la réponse aux attentes des consommateurs. L'innovation s'inscrit ainsi dans la continuité de l'invention qui est une création comme un nouvel objet, un nouveau procédé ou un nouveau système d'exploitation**

Une invention ne trouve pas forcément son marché commercial et peut rester un simple prototype comme la machine volante de Léonard De Vinci qui n'a jamais été commercialisée mais a permis d'engendrer de nombreuses autres inventions ou innovations. L'innovation est, à la fois, un processus plus long et plus étroit car elle suppose une introduction sur le marché - et plus large - car elle ne se limite pas aux avancées de la technologie ; elle concerne aussi bien la création du savoir que son application et sa diffusion. Il ne se passe pas une semaine sans que la presse fasse état de la découverte d'un matériau 'révolutionnaire' high-tech dont certains changeront en profondeur notre vie de tous les jours dans les années à venir. Et pourtant avant d'arriver sur le marché, plusieurs étapes doivent être franchies depuis l'idée jusqu'à la mise sur le marché ; étapes qui ne peuvent être franchies avec succès que si un continuum fluide existe entre la recherche fondamentale et appliquée et de ce fait entre structures publiques et privées. C'est dans les années 1990 que l'innovation devient une réelle préoccupation publique interministérielle avec l'initiative emblématique dite 'loi Allègre' qui a fortement encouragé la valorisation de la recherche publique. Depuis, les soutiens de l'Etat n'ont cessé de croître avec la mise en place de programmes nationaux et internationaux de la recherche à l'application industrielle avec budget de l'innovation en euros constant qui a doublé en 15 ans. Ce sont ainsi environ 10 Md€/an qui sont consacrés à l'innovation auxquels s'ajoutent des investissements exceptionnels de plusieurs milliards d'euros par an.

Même si notre système d'innovation reste encore largement perfectible, les résultats sont perceptibles au travers des classements mondiaux. Ainsi, la France se classe au 3ème rang mondial pour le nombre d'entreprises et d'organismes innovants (classement 2016 Thomson et Reuters<sup>1</sup>) avec 10 organisations françaises dans le Top 100 des innovateurs mondiaux. En 2016, 3 organismes français se retrouvent dans le Top 10 mondial des instituts publics de recherche en termes d'innovation, à savoir le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), l'Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (l'INSERM) et le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA). Parmi tous les domaines d'innovation, la filière chimie et matériaux illustre parfaitement la capacité de notre industrie à relever les défis de la mondialisation et de la transition écologique en s'engageant résolument dans la voie de l'innovation et de la montée en gamme. Elle apporte des solutions industrielles aux grands défis de notre économie (chimie du végétal et recyclage, bâtiment durable, stockage de l'énergie, impression 3D, numérique...) pour lesquels la France a de nombreux atouts comme souligné dans cet ouvrage. La constitution, en 2017, d'un ministère de plein droit de la recherche, de l'enseignement mais aussi, et c'est une première, de l'innovation souligne une réelle volonté gouvernementale d'accompagner les entreprises et les organismes publics dans les défis qui les attendent dans les années à venir. Les atouts de la France sont tels que les matériaux seront sans aucun doute au cœur de ces innovations qui nous permettront collectivement de prendre de vitesse nos concurrents.

1/ <https://www.letemps.ch/sciences/2017/04/15/textiles-collecteurs-energie-vetements-connectes>

1/ OECD : Material Resources , Productivity and the Environment (OECD Green Growth Studies)  
2/ ADEME : Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicule électrique et de véhicule Thermiques  
3/ UNEP : Assessing the environmental impacts of consumption and production : Priority Products and Materials.  
4/ Jacques VARET : Economie et matières premières minérales.  
5/ Forschungszentrum Jülich : Future perspectives of European Materials Research.

“Mettre en lumière les progrès des sciences, promouvoir leur diffusion et favoriser ainsi leur rayonnement”



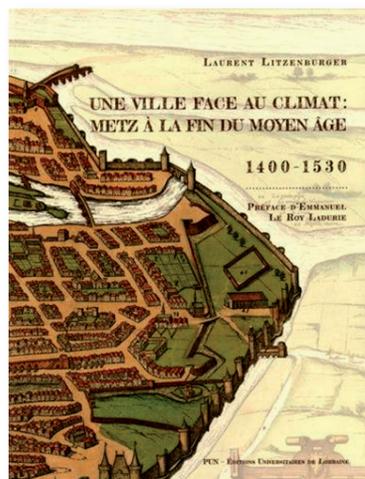
Fondée le 6 décembre 1828, la Société du Muséum d'Histoire Naturelle de Strasbourg décide en 1871, à la suite de l'annexion de l'Alsace par l'Empire allemand, de se transférer à Nancy. Elle prend alors le nom de Société des Sciences de Nancy. Les statuts déposés le 10 mars 1873 prévoient ainsi l'objet social de cette société : "la Société a pour but les progrès et la diffusion des sciences mathématiques, physiques et naturelles dans toutes leurs branches théoriques et appliquées. Elle y concourt par ses travaux et ses publications".

Le 26 avril 1968 l'ALS a été reconnue d'utilité publique. L'assemblée générale du 11 janvier 2001 a adopté de nouveaux statuts changeant le nom en Académie Lorraine des Sciences, ALS. Ces statuts ont été acceptés par le Ministère de l'Intérieur le 15 février 2002. Aujourd'hui la mission initiale de la Société des Sciences de Nancy est toujours celle de l'ALS qui se veut être :

- ▶ un carrefour d'informations et d'échanges sur la recherche scientifique en Lorraine,
- ▶ un centre pédagogique propre à ouvrir le monde scientifique au grand public,
- ▶ un lieu de mémoire retraçant les grandes activités scientifiques humaines,
- ▶ une plate-forme de rencontres pour les scientifiques européens et internationaux en liaison avec les pôles de recherche régionaux.

Pour ce faire, le Conseil d'Administration de l'ALS s'est fixé un plan d'actions :

- ▶ créer des relations avec les Universités et les centres de recherche,
- ▶ organiser des conférences données par des scientifiques venant de différents horizons,
- ▶ programmer des réunions réservées à des communications faites par de jeunes chercheurs pour présenter l'état de leurs travaux (les communications et conférences sont données lors des réunions mensuelles de l'ALS, accessibles à tout public. Le programme de ces réunions, ainsi que les textes des présentations sont disponibles sur le site Web de l'ALS),
- ▶ réaliser des colloques avec nos partenaires (l'ALS a ainsi signé un partenariat avec le Conseil Départemental de Meurthe-et-Moselle de façon à organiser des manifestations en lien avec le Château de Lunéville),
- ▶ sensibiliser les élèves des établissements d'enseignement sur l'importance des Sciences,
- ▶ attribuer des prix,
- ▶ proposer des visites de différents pôles scientifiques et techniques,
- ▶ participer aux journées de la Science,
- ▶ développer et animer un site web (ce site est accessible à l'adresse : <http://www.als.univ-lorraine.fr>)
- ▶ publier un bulletin et un magazine chargés de relater la vie associative de l'Académie et ses activités scientifiques. Ainsi l'Académie Lorraine des Sciences souhaite offrir une tribune aux chercheurs et présenter au public une vitrine des sciences développées en région.

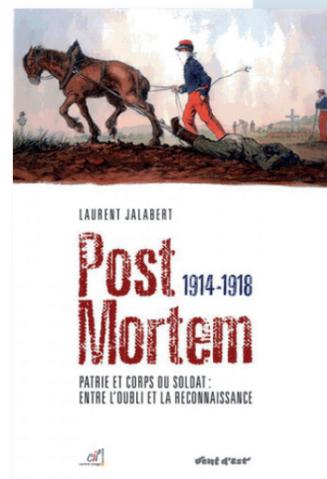


Les académiciens, au nombre maximal de 50, sont répartis en cinq sections :

- ▶ Section 1 : Mathématiques, Physique, Chimie, Électronique, Informatique, Génie des Procédés.
- ▶ Section 2 : Biologie animale et végétale, Sciences de l'environnement.
- ▶ Section 3 : Médecine, Médecine vétérinaire, Pharmacie.
- ▶ Section 4 : Sciences du sol, de la terre et de l'univers.
- ▶ Section 5 : Sciences humaines.

Dans l'esprit de sa profession de foi, le Conseil d'administration de l'Académie Lorraine des Sciences décerne chaque année un Grand Prix remis au cours d'une séance exceptionnelle. Ce prix est attribué pour la réalisation d'une oeuvre individuelle ou collective, commercialisée et susceptible d'intéresser un large public.

- ▶ En 2012 : *Les coulisses de la guerre de 1870 en Lorraine* de Jeanne Vincler, éditions Serpenoise.
- ▶ En 2013 : Floraine, l'association des botanistes de Lorraine, a conduit un vaste projet d'"Atlas de la flore lorraine". L'objectif visé était un inventaire de la flore selon un maillage 5 x 5 km, pour obtenir la meilleure connaissance possible de la répartition de toutes les espèces végétales vasculaires sur le territoire lorrain.
- ▶ En 2014 : Corinne Fenchelle-Charlot pour son livre sur Jules Crevaux aux éditions Gérard Louis.
- ▶ En 2015 : "Une ville face au climat: Metz à la fin du Moyen-Age" de Laurent Litzenburger, aux PUN, Editions Universitaires de Lorraine.
- ▶ En 2016 : "Post mortem 1914-1918 : Patrie et corps du soldat, entre l'oubli et la reconnaissance" par Laurent Jalabert aux Editions Vent d'Est.



L'Académie Lorraine des Sciences honore également chaque année un jeune chercheur ayant préparé dans l'un des laboratoires universitaires de Lorraine une thèse de doctorat. Les critères de choix sont l'originalité des travaux, leur valeur sur le plan fondamental et leurs possibles retombées sur le plan industriel et sociétal. Le montant de ce prix est fixé par le Conseil d'administration.

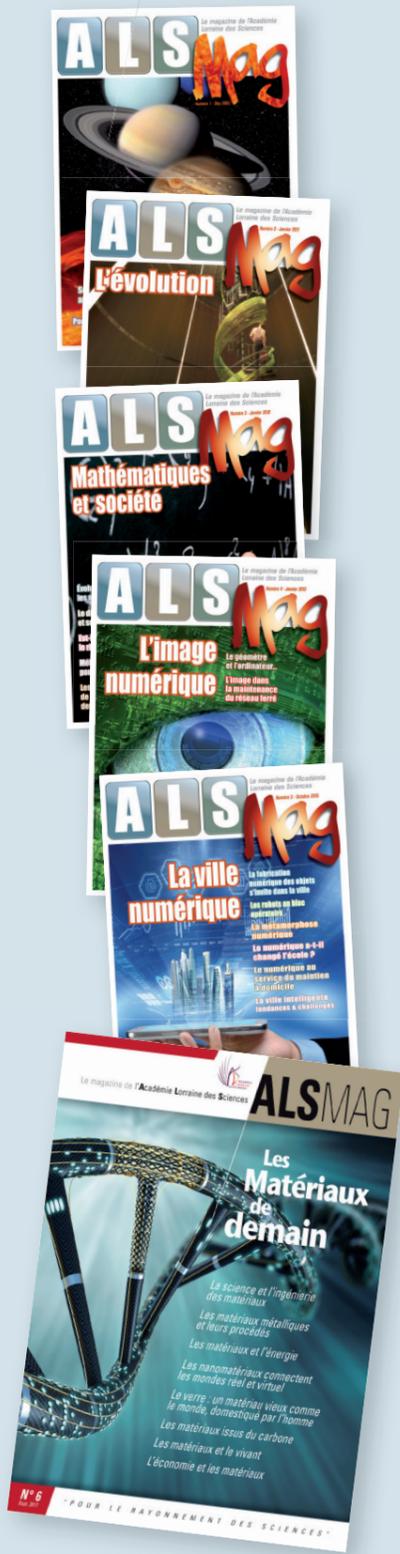
Les disciplines honorées concernent tour à tour le champ complet des Sciences et techniques mais aussi celui des Lettres, des Sciences humaines et des domaines de la Santé.

Ces disciplines changent chaque année :

- ▶ En 2011, **Chimie** : Florent Allix "Etude physico-chimique des organogels et aérogels".
- ▶ En 2012, **Sciences Économiques** : Oana Ionescu-Riffaud "Réversibilité du stockage géologique des déchets radioactifs : la théorie des options réelles dans l'aide à la décision".
- ▶ En 2013, **Sciences de la Terre** : Thomas Blaise "Histoire thermique et interactions fluides-roches dans l'Est du Bassin de Paris".
- ▶ En 2014, **Médecine** : Chiara Bernardi "Lymphocytose polyclonale à lymphocytes binucléés (LPLB) : registre français et étude transcriptomique (patients versus témoins)".
- ▶ En 2015, **Mathématiques** : Romain Duboscq "L'équation de Schrödinger: simulation du comportement stochastique des condensats de Bose-Einstein en rotation".
- ▶ En 2016, **Histoire** : Julie Bour "Entre national et local : Louis Jacquinet, archétype du notable modéré".

L'Académie Lorraine des Sciences organise des colloques dont les Actes sont disponibles sur le site de l'ALS :

- ▶ Darwin, héritage et enjeux pour notre société - 22 novembre 2009 (ce colloque a donné lieu au numéro 2 du magazine de l'ALS).
- ▶ Mathématiques et société - 20 novembre 2010 (thème du numéro 3 du magazine).
- ▶ Les cristaux de demain dans notre quotidien - 15 novembre 2014.
- ▶ Le stockage de l'énergie pour la mobilité contemporaine - 22 mai 2017.





ACADÉMIE LORRAINE DES SCIENCES

MÉTROPOLE DU GRAND NANCY  
22-24 VIADUC KENNEDY - C.O. 36  
54035 NANCY CEDEX

