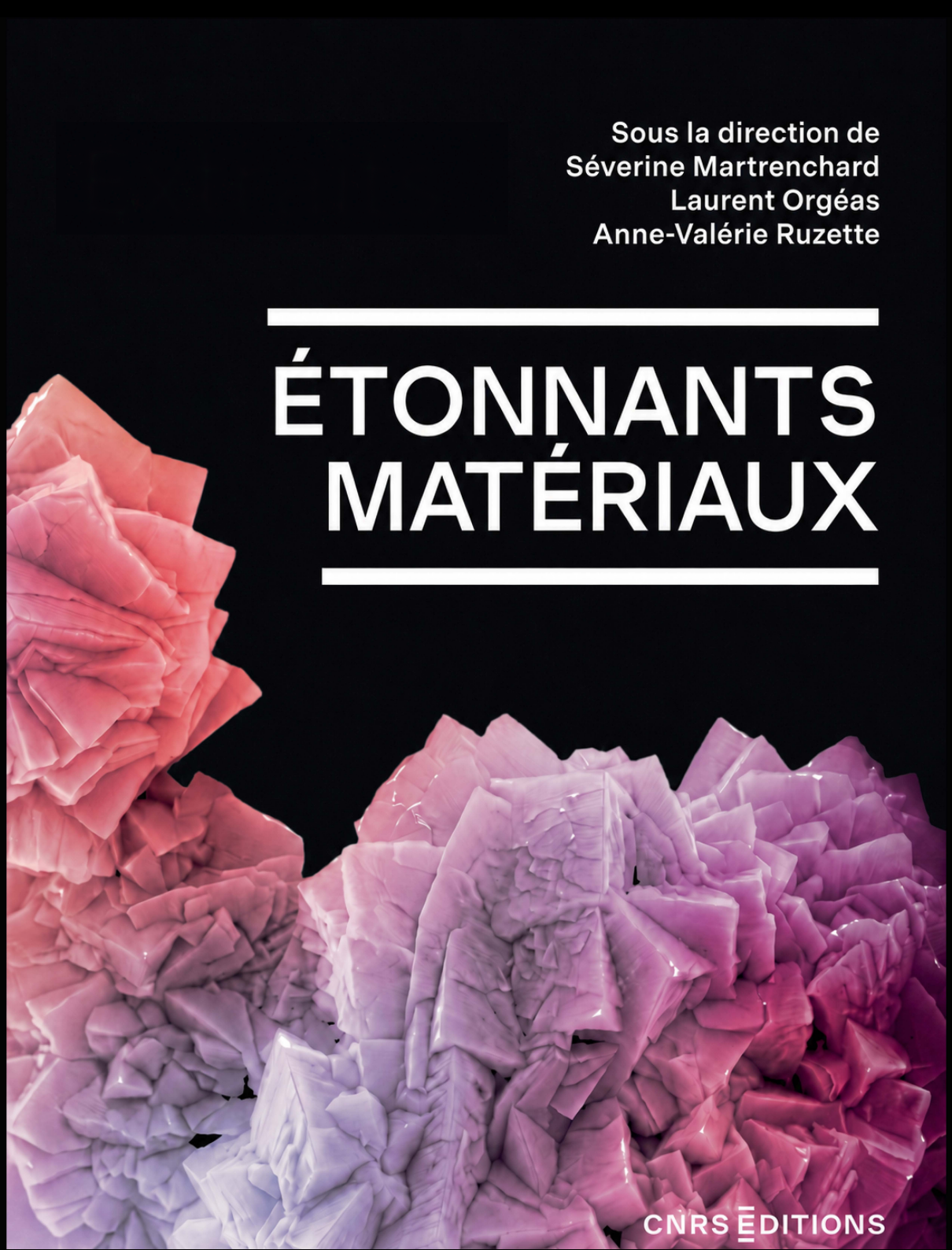


Sous la direction de
Séverine Martrenchard
Laurent Orgéas
Anne-Valérie Ruzette

ÉTONNANTS MATÉRIAUX



CNRS ÉDITIONS

Sous la direction
de Séverine Martrenchard, Laurent Orgéas et Anne-Valérie Ruzette

Étonnants matériaux

CNRS ÉDITIONS

15 rue Malebranche - 75005 Paris



15

Préface

Bernadette Charleux et Emmanuelle Gouillart



20

Métallurgie combinatoire

Alexis Deschamps et Hugo Van Landeghem



25

Tenaces comme du bois et résistants à plus de 1 000 °C

Gérard Louis Vignoles



30

Alliages à haute entropie

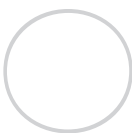
Stéphane Gorsse et Céline Varvenne



35

L'essor des matériaux durs

Yann Le Godec



42

La face cachée des révolutions en nanoélectronique

Isabelle Sagnes



47

Fibres photoniques et fibres multimatériaux

Laurent Bigot

53

Les matériaux épitaxiés

Noëlle Gogneau

PARTIE 1

ALLÉGER ET RENFORCER LES STRUCTURES

PARTIE 2

OPTIMISER LES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES ET QUANTIQUES

60 | Les matériaux pour la spintronique et l'oxytronique

Manuel Bibes et Vincent Cros

67 | La révolution des aimants moléculaires ?

Rodolphe Clérac

74 | Les secrets quantiques des terres rares

Diana Serrano et Philippe Goldner

79 | L'herbe est plus verte avec les nanocristaux

Emmanuel Lhuillier et Sandrine Ithurria

84 | Des isolants de Mott pour une électronique frugale

Laurent Cario, Maciej Lorenc et Étienne Janod

89 | Le diamant à la pointe de la technologie

Marie-Amandine Pinault-Thaury

PARTIE 3

PRODUIRE ET STOCKER L'ÉNERGIE

96 | La supraconductivité à haute température critique

Xavier Chaud

102 | Les matériaux pour le stockage solide de l'hydrogène

Laetitia Laversenne, Aude Bailly et Patricia de Rango

108 | Le futur des batteries se trouve peut-être dans votre cuisine !

Christel Laberty-Robert, Laurence Croguennec et Christian Masquelier

114 | Les nouveaux matériaux pour capter l'énergie solaire

Emmanuelle Deleporte, Jörg Ackermann, Sylvain Chambon, Nicolas Leclerc et Guillaume Wantz

120 | Membranes nanoporeuses

Cyril Picard

126 | Détonants matériauxMarc Comet, Cédric Martin, Émilie Médus, Fabien Schnell
et Guillaume GallandPARTIE 4
CONSTRUIRE DURABLEMENT**134** | Le « cancer du béton »

Maguy Jaber et Jean-François Lambert

140 | La biocimentation

Antoine Naillon, Fabrice Émeriault et Christian Geindreau

145 | Bien plus qu'un liant

Katerina Ioannidou et Cyril Aymonier

151 | Géopolymères et matériaux alcali-activés

Sylvain Meille et Élodie Prudhomme

156 | Les bois, étonnants matériaux issus du monde végétal

Bernard Thibaut et Joseph Gril

161 | Du nano au macro, nos vitrages sont des millefeuilles !

Aline Rougier, Jérémie Teisseire et Hervé Montigaud

PARTIE 5

ANIMER LA MATIÈRE ET MIMER LA NATURE

- 170** | De la molécule au muscle artificiel
Nicolas Giuseppone et Azzedine Bousseksou
- 175** | Quand les matériaux s'animent
Olivier Dauchot
- 180** | Des matériaux fluorescents sensibles
aux forces mécaniques
Clémence Allain, Azilis Desai et Rémi Métivier
- 186** | Quand les plastiques s'inspirent du vivant
pour devenir plus durables
Renaud Nicolaÿ et Jacques Lalevée
- 192** | Quand le papier se plie (presque) tout seul
Jérémie Viguié

PARTIE 6

STRUCTURER ET MODELER LA MATIÈRE MOLLE

- 200** | Comment structurer les nanocelluloses
Frédéric Pignon
- 205** | Étonnants textiles
Damien Durville et Audrey Steinberger
- 210** | Comment la pâte à pain coince-t-elle
les bulles de gaz ?
Guy Della Valle et Rémy Dendievel

215 | Quand la matière s'autoorganise : du bitume aux nanotechnologies

Jean-François Gérard et Guillaume Fleury

PARTIE 7
RÉPARER LE CORPS HUMAIN

222 | La métallurgie au cœur des vaisseaux sanguins

Thierry Gloriant

227 | Des biocéramiques pour régénérer les tissus osseux

Amandine Magnaudeix et Éric Champion

232 | Un biomatériau imprimé en 3D pour une reconstruction nasale complète

Agnès Dupret-Bories et Christophe Drouet

237 | L'os repensé par la science

Nadine Nassif

242 | La matière molle au service de la médecine

Rachel Auzély-Velty

PARTIE 8
RÉINVENTER LES PROPRIÉTÉS
AVEC LES MÉTAMATÉRIAUX

250 | Métamatériaux pour l'acoustique sous-marine

Charles Croëne, Laetitia Roux et Anne-Christine Hladky

255 | Des métamatériaux gonflés

Étienne Reyssat, José Bico et Benoit Roman

- 261** | Des métamatériaux nanostructurés
pour maîtriser la lumière
Yanko Todorov
- 267** | De la matière molle aux métamatériaux
optiquement actifs
Alexandre Baron

PARTIE 9

CONTRÔLER ET EXPLOITER L'ULTRAFIN

- 276** | Mystérieuses surfaces où tout se joue
Christine Blanc et Dimitri Mercier
- 281** | Fabrication couche par couche
Catherine Marichy et Alexandra Fateeva
- 287** | Des cristaux incroyablement fins
Johann Coraux
- 292** | Graphène et matériaux graphéniques :
toute une famille !
François-Xavier Coudert
- 298** | Les MXènes
Stéphane Célérier et Vincent Mauchamp

PARTIE 10

FABRIQUER ET TRANSFORMER LA MATIÈRE

- 306** | L'art de façonner la matière
Jean-François Gérard
- 311** | L'impression 4D
Frédéric Demoly
- 316** | Microfluidique, la révolution invisible de l'industrie
Isaac Rodriguez-Ruiz
- 321** | Les procédés de nanofabrication
Dominique Mailly
- 327** | Comment poussent les cristaux
Alexandra Peña Revellez et Julien Zaccaro

PARTIE 11

ANTICIPER LA FIN DE VIE DÈS LA CONCEPTION

- 336** | Analyse du cycle de vie et écoconception
pour des matériaux plus durables
Guido Sonnemann
- 341** | Les défis des matériaux au cœur de la transition
énergétique
Cyril Aymonier, Sylvain Caillol, Stéphane Pellet-Rostaing
et Vincent Placet
- 352** | La fin de vie des textiles : des matériaux recyclables ?
Jannick Duchet-Rumeau

357 | Quand Mère Nature emballe l'avenir

Candice Rey et Julien Bras

PARTIE 12

OBSERVER ET RÉVÉLER L'INVISIBLE

364 | De très grands instruments pour sonder les matériaux à l'échelle atomique

René Guinebretière

370 | Voyage au cœur d'une batterie en fonctionnement

Élodie Salager, Sandrine Lyonnard et Charlotte Mouravieff

377 | Des savoirs médiévaux dissimulés dans les matériaux des armures

Philippe Dillmann, Émilie Bérard et Solenn Reguer

382 | Voir l'invisible en 3D

Éric Maire, Pierre Lhuissier et Stéphane Roux

387 | Voir s'animer le monde au nanomètre

Williams Lefebvre

392 | Observer la transformation des matériaux à l'échelle du millionième de milliardième de seconde

Emmanuelle Jal et Éric Collet

PARTIE 13

MODÉLISER ET SIMULER
POUR MIEUX CONCEVOIR

- 400** | Modélisation multi-échelle de la déformation
des matériaux
David Rodney
- 406** | Simuler pour comprendre et prédire
Yannick Dappe
- 411** | Simuler la structure de grains des alliages
métalliques
Charles-André Gandin
- 416** | La simulation assistée par l'intelligence artificielle
Francisco Chinesta et Antonino Marco Saitta
- 423** | Conclusion
Lionel Buchaillot, Thierry Dauxois et Sandrine Sagan
- 426** | Glossaire
- 436** | Remerciements
- 439** | Auteurs et autrices
- 443** | Légendes des images d'ouverture de parties

Préface

Saviez-vous que notre quotidien est rempli de matériaux aux propriétés étonnantes ?

Pour le découvrir ou le redécouvrir, *Étonnants matériaux* nous invite à explorer un vaste domaine de matières et d'applications dans un voyage au cœur des laboratoires de recherche dédiés aux matériaux.

Des savoir-faire ciselés au cours des siècles renaissent aujourd'hui grâce à la science. De nouvelles technologies d'analyse multi-échelle permettent de déchiffrer leurs secrets anciens, offrant ainsi une compréhension plus aboutie de la chimie et de la physique impliquées.

Le ciment, qui lie le béton ou les mortiers, n'a pas fini de nous surprendre. Sa fabrication peut-elle être plus économe en énergie ? Quelles sont les alternatives pour le rendre plus respectueux de l'environnement ? Existe-t-il des solutions pour le guérir de ses pathologies ? Ce livre esquisse des réponses et nous offre des perspectives pour la construction d'ouvrages plus durables utilisant de nouvelles matières premières et, demain, l'action de bactéries. Les chercheurs conçoivent des ciments intelligents capables de capter le CO₂, réfléchir la chaleur ou stocker l'énergie.

Le bois et le verre restent essentiels à la construction durable. Le bois provient d'une grande variété d'espèces aux propriétés différentes. Il s'agit de construire mieux en le connaissant mieux. Au verre nous devons la lumière et l'esthétique de nos bâtiments, mais aussi sa capacité à nous protéger du froid et de la chaleur grâce à un empilement nanométrique de couches d'argent et d'oxydes métalliques. Ces propriétés de surface peuvent même devenir intelligentes si elles sont rendues actionnables. Le verre reste donc un matériau d'avenir, porté par des procédés de fabrication toujours moins énergivores et basés sur le recyclage.

Le textile illustre la réinvention des matériaux. C'est un bel exemple de structure multi-échelle dont les propriétés mécaniques font l'objet de travaux de simulation et modélisation utilisant les techniques les plus avancées.

Au-delà des matériaux passifs, émergent des matières actives inspirées du vivant : des muscles artificiels, des matériaux qui s'animent spontanément

ou s'adaptent à leur environnement, d'autres qui rendent optiquement visible une contrainte mécanique à laquelle ils sont soumis, des plastiques qui s'autoréparent, du papier que l'on peut architecturer à façon grâce à des hydrogels végétaux, des copolymères à blocs qui renforcent les bitumes ou sont utilisés comme supports aux nanotechnologies. Même la pâte à pain inspire les chercheurs qui utilisent la tomographie X pour mieux comprendre la formation de sa structure alvéolaire si prisée des amateurs de baguette. On connaît tous la cellulose, mais qui connaît les nanocelluloses et leur comportement remarquable en suspension aqueuse pouvant conduire à des hydrogels, des films ou des nanocomposites ? Quant aux métamatériaux, l'organisation de la matière donne lieu à des propriétés émergentes : furtivité optique ou acoustique, structures gonflables où des canaux permettent de passer d'une feuille plate à des volumes complexes.

En médecine, la technologie s'invite sous notre peau : les métaux, les céramiques, les polymères, les hydrogels ont toute leur place pour réparer les défaillances de nos organismes. Des stents en alliages métalliques biocompatibles autoexpansibles sont en développement. Des biocéramiques sont employées comme supports pour la réparation osseuse et finissent par être biorésorbées une fois leur mission achevée. Un biomatériau microporeux a été imprimé en 3D pour la reconstruction nasale.

À l'échelle atomique ou subatomique, les effets quantiques dominent. La supraconductivité porte la promesse d'économies d'énergie colossales – si on arrive dans le futur à maintenir cette propriété à température ambiante. Les isolants de Mott, avec le dégel contrôlé des électrons, ouvrent la voie à une électronique plus frugale, un enjeu de taille à l'ère de l'intelligence artificielle.

Mais les propriétés des matériaux viennent la plupart du temps d'une combinaison d'échelles : atomique, cristallographique, microstructurale... C'est le cas, par exemple, pour le stockage de l'hydrogène dans des hydrures, où il faut à la fois un réseau cristallographique compatible pour accueillir l'hydrogène, et une petite taille de grain pour favoriser sa diffusion. Si les outils de modélisation numérique ont fait de gigantesques progrès, cela reste un enjeu de taille de prendre en compte, en même temps, ces différentes échelles, comme des poupées russes : un tour de force possible uniquement pour des matériaux très simples à l'heure actuelle.

À toutes ces échelles, il faut pouvoir sonder la matière pour comprendre le lien entre son organisation et ses propriétés. Les expériences aujourd'hui de routine dans les laboratoires, comme la microscopie électronique à balayage ou la diffraction des rayons X, ont été rendues possibles par les

progrès de la physique. Et si les scientifiques redoublent d'ingéniosité avec de nouvelles techniques de caractérisation, en particulier avec les grands instruments, c'est grâce aux progrès de la science et de la technologie : avec le laser à électrons libres, l'observation des transitions ultrarapides de la matière commence à être possible.

Pour bénéficier pleinement des propriétés chimiques et physiques des matériaux, la mise en œuvre des applications nécessite l'apport de procédés de fabrication. La matière se réinvente avec le progrès des technologies qui permettent de la façonner. Des gestes ancestraux, puis des outils de plus en plus sophistiqués lui ont donné ce pouvoir de transformation. Impression 3D puis 4D, dépôts de couches minces, microfluidique, manipulation à l'échelle microscopique, nanoscopique en constituent quelques exemples.

La vie des matériaux ne se limite pas à leur période d'utilisation. En alliant chimie, physique et procédés de fabrication, ils ont un impact sur l'environnement, de l'extraction des matières premières à leur fin de vie. Pour être contrôlé et minimisé, cet impact doit être mesuré. C'est l'objectif de la pensée cycle de vie et de ses outils d'analyse et d'écoconception. Le recyclage, par exemple, est un enjeu d'importance, négligé dans le passé car souvent peu économiquement viable. Pensons, par exemple, à la fin de vie des textiles, des éoliennes, des emballages.

Ce voyage nous invite à regarder autour de nous avec curiosité, à toucher les objets du quotidien en les découvrant comme des histoires vivantes, et à inventer le monde de demain à hauteur de nos rêves et de notre responsabilité.

Bernadette Charleux,
directrice R&D Chimie de la Construction de Saint-Gobain,
membre de l'Académie des Technologies,
membre honoraire de l'Institut Universitaire de France.

Emmanuelle Gouillart,
directrice de l'ESPCI,
directrice scientifique de Saint-Gobain Recherche
de 2020 à 2026.

L'herbe est plus verte avec les nanocristaux

Emmanuel Lhuillier et Sandrine Ithurria

Les matériaux semi-conducteurs ont envahi notre quotidien : ils sont à la base des transistors des puces de nos ordinateurs et de nos smartphones mais également des LED (diodes électroluminescentes) de nos écrans modernes. Une nouvelle révolution est en route grâce à leur utilisation sous forme de nanoparticules...

Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ?

Intermédiaire entre un métal et un isolant, un matériau semi-conducteur est caractérisé par un profil énergétique comportant une « bande de valence » remplie d'électrons et une « bande de conduction » vide d'électrons, séparées par une « bande interdite ». L'absorption de lumière permet aux électrons de passer de la bande de valence à la bande de conduction et inversement pour l'émission de lumière. L'énergie de la bande interdite détermine alors les propriétés optiques du semi-conducteur (**Figure 1**). Le silicium, matériau roi pour les puces électroniques, n'est pas adapté à la production de lumière : il absorbe peu et n'émet pas. Pour combler ce manque, d'autres matériaux semi-conducteurs doivent être utilisés.

Par ailleurs, la fabrication de la grande majorité des matériaux semi-conducteurs repose sur des techniques de croissance combinant le vide et/ou de hautes températures, ce qui, dans un contexte de sobriété énergétique, est moins favorable. Il existe cependant des alternatives basées sur l'électronique organique (utilisée pour les LED organiques (OLED) par exemple) ou sur les nanomatériaux.

Réduire la taille pour changer la couleur d'émission

Quand un semi-conducteur est réduit à une taille de quelques nanomètres, ses propriétés optiques sont modifiées par rapport au matériau massif. La transition optique entre les deux bandes ne se fait plus au centre du diagramme, là où la séparation en énergie des bandes est la plus faible, mais pour une énergie plus élevée (**Figure 1**), directement en lien avec la taille du nanocristal. C'est le confinement quantique. Il permet d'augmenter l'énergie de la transition par rapport au matériau massif. Ainsi, pour un matériau donné, il devient possible de couvrir toute la plage de lumière visible en ajustant sa taille, comme montré pour une série de suspensions de nanocristaux de sélénure de cadmium (CdSe) sur la **Figure 1**. Lorsqu'elles sont excitées avec une lampe ultraviolette, les particules les plus grosses, de diamètre 6 nm, émettent de la lumière rouge alors que celles de diamètre 2 nm émettent de la lumière bleue. En pratique, le confinement quantique a été une vraie révolution pour les semi-conducteurs. Avant cette découverte, les propriétés optiques étaient ajustées grâce à la fabrication d'alliages aux propriétés intermédiaires entre celles des matériaux purs. Or la réalisation de tels mélanges de semi-conducteurs est délicate, sans solution systématique.

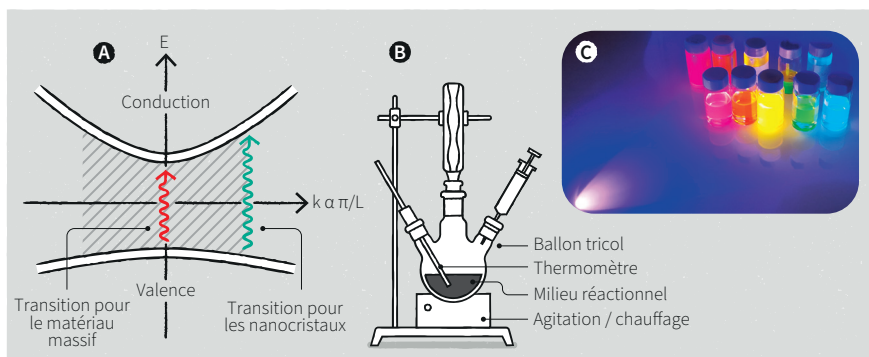


Figure 1. Nanocristaux et confinement quantique. (A) Structure électronique simplifiée d'un semi-conducteur avec une bande de valence pleine d'électrons et une bande de conduction vide d'électrons. Habituellement, dans le matériau massif, la transition a lieu au centre du diagramme, là où les bandes sont les plus proches en énergie. Dans un nanocristal, la taille finie de la particule provoque un glissement de la transition vers une énergie plus élevée, ce qui se traduit par un décalage des transitions énergétiques vers le bleu. (B) Schéma d'un dispositif de synthèse de nanocristaux en suspension. (C) Image d'une série de suspensions de nanocristaux de sélénure de cadmium (CdSe) éclairées par une lampe à ultraviolets.

Synthétiser les nanoparticules...

La croissance des nanoparticules se fait en solution dans un dispositif présenté **Figure 1**. Les matériaux dont les synthèses sont les mieux maîtrisées sont le séléniure de cadmium (CdSe), le phosphore d'indium (InP), le sulfure de plomb (PbS) et le tellurure de mercure (HgTe)...., des semi-conducteurs binaires formés de deux éléments chimiques, dont les électrons de valence se répartissent de manière à satisfaire la règle de l'octet (couche électronique externe complète). Mais, cette stratégie est très versatile et des semi-conducteurs de compositions plus complexes peuvent être synthétisés. Les précurseurs de ces atomes vont réagir en solution, en présence de petites molécules organiques – appelées ligands – à des températures comprises entre 50 et 300 °C. Cette méthode de croissance est donc peu énergivore, en comparaison de la croissance traditionnelle qui se fait entre 500 et 1 000 °C. Les nanoparticules ainsi formées présentent un cœur de semi-conducteur inorganique couvert par une couronne de ligands permettant la suspension des nanoparticules en solution.

... pour les incorporer dans les écrans de télévision !

Identifier l'application dans laquelle ces nanoparticules apportent un avantage déterminant a pris près d'une vingtaine d'années, de la mise au point de la méthode de synthèse au début des années 90 à la commercialisation des premiers téléviseurs à base de nanocristaux. C'est ce qui a valu à Bawendi, Brus et Ekimov le prix Nobel de chimie en 2023.

Pour reconstituer les couleurs, un écran a besoin de 3 types de pixels : rouges, verts et bleus. Un écran LED d'un téléviseur de milieu de gamme repose sur une diode bleue à base de nitrure d'indium et de gallium (InGaN). Cette diode sert à la fois d'émetteur bleu, mais aussi de source d'excitation pour des colorants de plus faible énergie d'émission qui servent à transformer la lumière bleue en lumière blanche. Historiquement, ces colorants étaient des atomes de cérium encapsulés dans une matrice inerte d'oxyde (Ce:YAG).

Cependant la palette de couleurs atteinte par de tels écrans est limitée. Pour comprendre cela, il faut considérer le diagramme de chromaticité, qui est une projection graphique de ce que perçoivent nos yeux selon la couleur générée par une source de lumière (**Figure 2**). Si les sources

sont très pures spectralement (sources monochromatiques telles que des lasers), l'ensemble du diagramme peut être atteint. En revanche, avec des sources moins pures spectralement (élargissement du pic), le diagramme se réduit et la palette des couleurs obtenue aussi.

En pratique, l'impact est édifiant dans le vert, là où l'œil est le plus sensible grâce à des années de sélection naturelle qui ont rendu notre œil sensible là où le soleil émet le plus de lumière. Autrement dit, pour avoir une palette étendue de couleurs reproduite par un écran, il est critique d'avoir une source verte fine spectralement.

Ce qui aurait pu rester un détail pour ophtalmologiste devient un enjeu industriel majeur. En effet, une partie significative de ce qui est retransmis sur nos écrans est du sport pratiqué sur pelouse « verte », couleur dont la chlorophylle a optimisé l'absorption pour s'accorder avec le spectre du soleil.

Ainsi, les industriels ont souhaité échanger le Ce:YAG par des nanocristaux d'émissions étroites, en particulier dans le vert (**Figure 2**). En pratique, un écran à base de nanocristaux est devenu la combinaison de la diode bleue avec un mélange de nanocristaux émettant dans le vert et le rouge afin de générer une lumière blanche. Cette lumière est ensuite filtrée par des cristaux liquides pour former les pixels bleus, verts et rouges de nos écrans.

Les enjeux actuels des semi-conducteurs pour les écrans sont de continuer à affiner spectralement leur émission ; cela peut, par exemple, être obtenu avec des nanocristaux bidimensionnels (les nanoplaquettes).

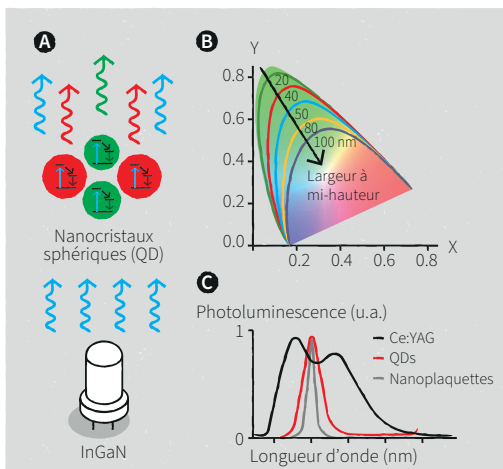


Figure 2. Nanocristaux pour les écrans. (A) Schéma de principe d'un écran à base de nanocristaux : une diode bleue, faite d'InGaN, excite des nanocristaux émettant du vert et du rouge. (B) Diagramme de chromaticité présentant l'ensemble des couleurs perçues par l'œil humain. Plus la lumière émise par la source est large spectralement, plus la palette de couleurs perçues se réduit ; l'impact est particulièrement dramatique dans le vert, là où l'œil est le plus sensible. (C) Spectre de photoluminescence de différents chromophores : Ce:YAG, des nanocristaux sphériques (QD) et des nanocristaux bidimensionnels : les nanoplaquettes.

Bientôt dans nos smartphones

Un autre objectif est de ne plus se limiter aux téléviseurs, mais aussi de les utiliser dans les systèmes sur batterie pour adresser le marché des smartphones. Dans ce cas, pour consommer moins d'énergie, il ne s'agit plus d'exciter optiquement chaque nanocristal pour qu'il émette de la lumière mais que chaque pixel soit une LED alimentée électriquement.

Enfin, pourquoi se limiter aux écrans et ne pas aller jusqu'au marché de l'éclairage ? Mais cela requiert un fonctionnement dans des conditions agressives pour produire beaucoup plus de lumière (les températures internes des LED dépassent alors les 100 °C), nécessitant la mise au point de techniques avancées d'encapsulation.

Références

- E. Lhuillier *et al.*, « Chemistry Nobel Prize celebrates colloidal quantum dots: highly-engineered, spectrally pure light », *Photoniques*, n° 122, p. 18-20, 2023.
- B. T. Diroll *et al.*, « 2D II-VI semiconductor nanoplatelets: From material synthesis to optoelectronic integration », *Chemical Reviews*, vol. 123, 2023, p. 3543-3624.

La matière molle au service de la médecine

Rachel Auzély-Velty

Le genou est une articulation essentielle mais fragile. Chutes, chocs ou mauvaises postures à répétition peuvent l'endommager ou favoriser son usure prématurée, voire l'apparition d'arthrose. Cette maladie, également liée au vieillissement naturel, touche plus de 500 millions de personnes dans le monde. Elle se manifeste par la dégradation progressive du cartilage, des changements dans l'os sous-jacent, des réactions inflammatoires locales et des modifications des tissus mous autour de l'articulation. Le traitement le plus courant consiste à injecter une substance gélatineuse, un hydrogel, directement dans l'articulation abîmée. Sa consistance est comparable à celle du liquide synovial, gel naturel qui entoure et protège le cartilage articulaire. Cette injection permet d'améliorer le glissement des surfaces de l'articulation dans les cas d'usure articulaire ou de prévenir l'usure en cas de traumatisme.

Du jelly à la chirurgie

Les hydrogels, matériaux souples et riches en eau, sont partout autour de nous : dans nos assiettes (gélifiant, gélatine, agar-agar...), dans nos tubes de crème et autres cosmétiques, sur nos pupilles (lentilles de contact), dans les couches superabsorbantes ou encore autour de certains médicaments (pansements gastriques, produits d'infiltration, gels cicatrisants et anti-inflammatoires buccaux). De même consistance que les tissus vivants, ils sont très utiles en médecine régénérative, un domaine qui vise à réparer ou remplacer les tissus abîmés du corps, comme la peau, le cartilage ou même du tissu cérébral. Grâce à leurs propriétés uniques, les hydrogels biocompatibles peuvent également servir de support temporaire ou « échafaudage » qui aide des cellules recrutées ou implantées à se développer, se renouveler et reconstruire des tissus endommagés. Ils peuvent également servir d'im-

plant pour délivrer de manière prolongée et localisée des médicaments dans le corps.

Les hydrogels sont des réseaux tridimensionnels (3D) formés de longues chaînes de polymères hydrophiles reliées entre elles par des liaisons fortes, appelées points de réticulation. Il en résulte un réseau 3D capable de gonfler en absorbant de très grandes quantités d'eau. La densité de réticulation (ρ_x), soit le nombre de points de réticulations dans un volume donné, contrôle de nombreuses propriétés fondamentales comme le taux de gonflement (Q), la rigidité (G) et le coefficient de diffusion (D) des molécules piégées dans le gel (**Figure 1**).

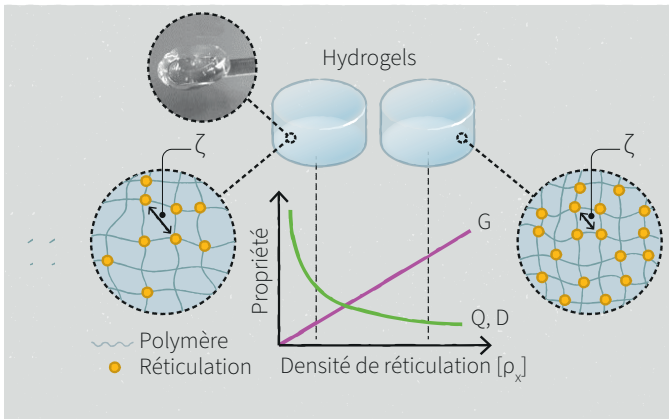


Figure 1. Relation entre la densité de réticulation et les propriétés des hydrogels.

Deux structures de réseau de faibles et fortes densités de réticulation sont illustrées afin de mettre en évidence l'impact de la densité de réticulation sur les propriétés fondamentales des hydrogels : la rigidité (G), le taux de gonflement à l'équilibre (Q) et la diffusivité (D). À mesure que ρ_x augmente, la taille des mailles du réseau (Z), qui correspond à l'espace disponible entre les chaînes polymère pour la diffusion, diminue.

Les hydrogels ont fait leur entrée en médecine dans les années 1960. Les matériaux utilisés présentent cependant certaines limites que tentent de lever les scientifiques. Du fait de la nature non réversible des liaisons entre les chaînes polymère, ces biomatériaux sont certes mous mais ne s'écoulent pas. Ils sont statiques et nécessitent une implantation chirurgicale invasive pour accéder aux tissus non superficiels à réparer. Ils sont également incompatibles avec les nouvelles technologies de plus en plus utilisées en médecine comme l'impression 3D.

Entre solide et liquide, il faut choisir...ou pas

Pour surmonter ces limitations, les chercheurs et chercheuses ont développé des hydrogels de nouvelle génération, malléables et adaptables. Ces matériaux innovants peuvent être administrés par simple injection à l'aide d'une aiguille ou d'un cathéter. Bien moins invasive pour le patient, cette approche permet d'envisager de nombreuses applications cliniques prometteuses (**Figure 2**).

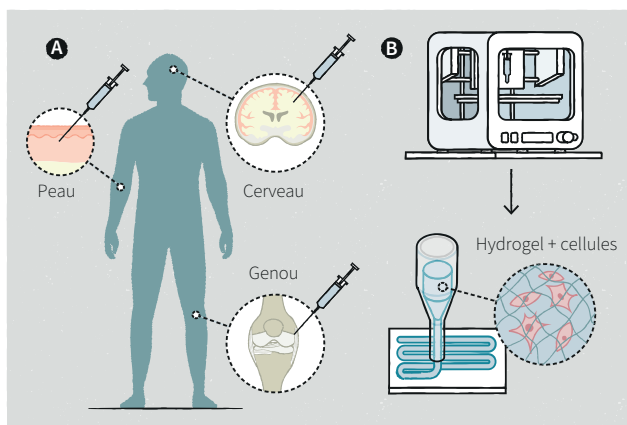


Figure 2. (A) Les hydrogels injectables sont conçus pour répondre à différents besoins thérapeutiques comme le soutien à la régénération neuronale après un AVC, la réduction des symptômes de l'arthrose, ou encore l'administration intradermique de principes actifs. (B) Ils sont aussi compatibles avec la bioimpression 3D d'organes ou de tissus.

Les premiers hydrogels injectables qui ont été mis au point pour des applications médicales sont des solutions liquides de polymères capables de se transformer en gel directement dans le corps. Ces matériaux sont constitués de polymères dits «sensibles à leur environnement» qui ont la particularité de changer d'état selon les conditions qui les entourent : liquides à température ambiante ou dans des conditions inhabituelles pour le corps (milieu acide ou sans sel), ils se transforment en gel une fois injectés dans l'organisme, sous l'effet de la température corporelle, du pH physiologique ou de la présence de sels. Bien que ces premiers systèmes injectables aient connu un vrai succès, beaucoup présentent des problèmes de cinétique de formation du gel («gélification»). Certains gélifient trop rapidement et se solidifient dans la seringue, d'autres trop lentement et libèrent prématurément leur contenu *in vivo*.

Les scientifiques se sont donc plutôt tournés vers des hydrogels dits «dynamiques». Ces hydrogels, préformés en seringues, sont solides au repos mais deviennent suffisamment fluides pour être extrudés sous cisail-

lement. Les forces appliquées par le piston de la seringue sont par exemple suffisantes pour leur permettre de s'écouler dans l'aiguille et être injectés. Une fois la contrainte supprimée, c'est-à-dire à la sortie de l'aiguille, ils retrouvent rapidement leur état de gel (**Figure 3A**). Derrière cette propriété se cache une réalité chimique fondamentale : la nature réversible des points de réticulation qui confère aux hydrogels dynamiques des capacités d'autoréparation.

Ces liaisons réversibles peuvent être de nature covalente (chimiques) ou reposer sur des interactions plus faibles, dites non covalentes. L'intérêt pour ces hydrogels dynamiques remonte aux années 1980, avec la création des premiers réseaux capables de s'autoréparer, élaborés à partir de polymères naturels glucidiques. Cependant, ce n'est qu'au début des années 2000 que les chimies non covalentes ont commencé à être exploitées pour fabriquer des hydrogels supramoléculaires injectables impliquant notamment des interactions de type « clé-serrure », et des interactions physiques résultant de mélanges de biopolymères.

Des hydrogels autoréparants pour nos genoux

La mise au point de ces matériaux soulève cependant un défi fondamental : concilier injectabilité, autoréparation et stabilité physique. Il s'agit de trouver un compromis entre la stabilité mécanique, liée à la force et la densité des points de réticulation, et la réversibilité de ces liaisons, indispensable pour permettre l'injection et l'auto-réparation après déformation ou rupture du réseau. Le comportement dynamique des liaisons réversibles est donc au cœur de cette problématique. Il repose sur trois paramètres essentiels. Le premier est la vitesse à laquelle les liaisons se forment (k_a) : plus cette vitesse est élevée, plus le gel se forme rapidement et peut se réparer efficacement, après injection par exemple. Le deuxième est la vitesse à laquelle les liaisons se dissocient (k_d) : si elle est élevée, cela rend le gel plus fluide, ce qui facilite son injection. Le troisième paramètre, appelé K_{eq} , correspond au rapport entre ces deux vitesses et reflète la proportion moyenne de liaisons présentes dans le gel à un instant donné. Plus K_{eq} est élevé, plus le gel est rigide. En jouant sur ces paramètres, on peut ajuster les propriétés du matériau selon les besoins médicaux ou technologiques.

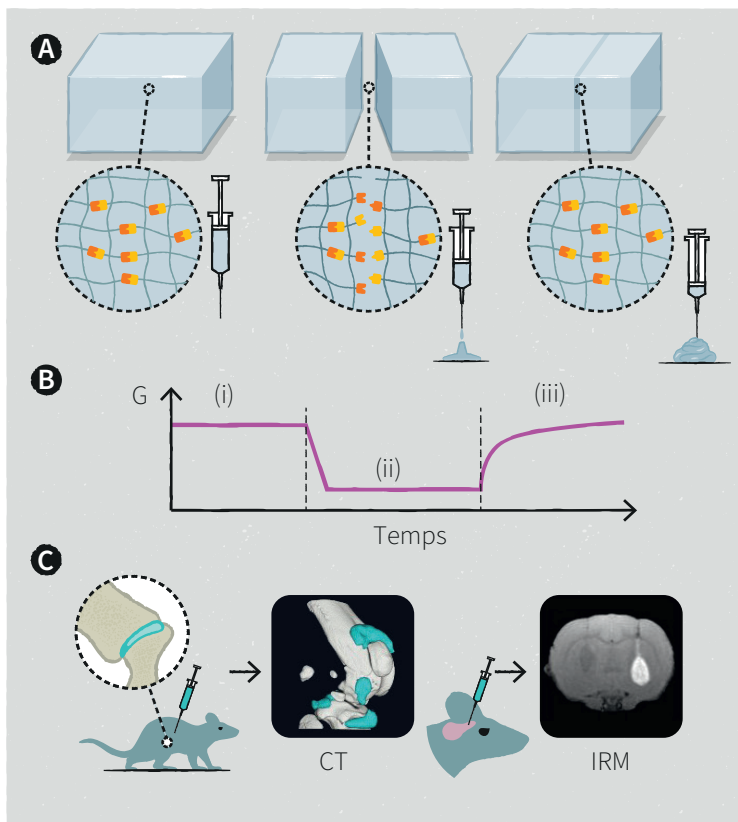


Figure 3. (A) Comportement d'un hydrogel injectable autoréparant : prérempli dans une seringue, il peut être extrudé sous cisaillement par injection à l'aiguille et retrouver rapidement sa structure gélifiée dès que la contrainte est levée. Cette capacité est due à la nature réversible des points de réticulation. (B) Évolution de la rigidité de l'hydrogel au cours du temps (i) au repos, (ii) sous cisaillement lors de l'injection et (iii) après relâchement de la contrainte. (C) Visualisation de l'hydrogel d'acide hyaluronique (en bleu dans le genou et en blanc dans le cerveau) après marquage spécifique à l'iode pour l'imagerie tomodensitométrique spectrale (CT), et au gadolinium pour l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

Bien qu'essentielle, cette cinétique de formation et dissociation des liaisons réversibles n'est pas le seul critère à prendre en compte pour garantir le succès applicatif des hydrogels dynamiques. Leur comportement d'auto-réparation (reformation propre d'un gel après injection, sans écoulement de liquide en dehors du site traité) implique également des aspects complexes de la physique des polymères qu'il faut mesurer. La rhéologie*, qui étudie la réponse dans le temps du gel aux contraintes extérieures comme le cisail-

ment dans la seringue, s'avère être un outil précieux pour évaluer et ajuster la cinétique d'autoréparation de ces matériaux (**Figure 3B**).

Un premier exemple d'hydrogel dynamique autoréparant a ainsi été conçu avec succès à partir d'acide hyaluronique, un biopolymère naturellement présent dans le corps humain et constituant clé des tissus vivants. Le suivi de l'injection par des techniques d'imagerie clinique non-invasive après marquage spécifique de l'hydrogel avec des agents de contraste indique que cet hydrogel peut être injecté avec précision dans l'articulation du genou et le cerveau de rongeurs (**Figure 3C**). Testé sur des souris atteintes d'arthrose, son action, suivie en direct par imagerie, montre qu'il ralentit la dégradation du cartilage et des os. Bien qu'ils ne soient pas encore à l'étape de tests cliniques, ces gels versatiles pourraient bien devenir la béquille de nos articulations fatiguées.

Références

- E. Pezron, L. Leibler, A. Ricard, R. Audebert, « Reversible gel formation induced by ion complexation. 2. Phase diagrams », *Macromolecules*, vol. 21, 1988, p. 1126-1131.
- T. Aida, E. W. Meijer, S. I. Stupp, « Functional supramolecular polymers », *Science*, vol. 335, 2012, p. 813-817.
- S. Moustoifa *et al.*, « A self-healing radiopaque hyaluronic acid hydrogel as a new injectable biomaterial for precision medicine in osteoarthritis », *Theranostics*, vol. 15, 2025, p. 4054-4073.

Métamatériaux pour l'acoustique sous-marine

Charles Croënne, Laetitia Roux
et Anne-Christine Hladky

De leur découverte pendant la seconde guerre mondiale

En août 1944, en cinq jours, quatre navires alliés sont torpillés dans la Manche alors qu'aucun sous-marin allemand n'avait été détecté dans la zone. Début 1945, les services secrets britanniques interceptent des messages radio envoyés avec la machine de codage allemande « Enigma ». Ils découvrent le nom « Alberich » (**Figure 1A**), un personnage de la mythologie germanique capable de se rendre invisible avec une cape d'invisibilité, et concluent à l'existence d'un mystérieux sous-marin ayant une capacité d'invisibilité similaire à la cape d'Alberich. Se détournant de leur route maritime habituelle, les Anglais minent la précédente, le long de laquelle le fameux sous-marin allemand invisible U-480 cherche alors en vain des cibles jusqu'à sa destruction par une mine en février 1945.

Son épave a été repérée en 1998 près de l'île de Wight. Les plongeurs ont alors découvert qu'il s'agissait du premier « sous-marin furtif » au monde. Le U-480 disposait en effet d'une « peau » à texture astucieuse ayant pour but de complexifier la détection sonar. Cette structure bien particulière consistait en une dalle de caoutchouc de 4 mm d'épaisseur, faite d'une couche de 2 mm homogène en contact avec le milieu extérieur, et d'une autre couche de 2 mm comportant des alignements de trous de deux diamètres différents judicieusement répartis et formant des cavités d'air (**Figure 1B**). Du fait des résonances des cavités, cette structure présentait une atténuation forte, de plus de 30 dB dans la gamme de fréquence de 8 kHz à 18 kHz, même sous une immersion de 90 m.

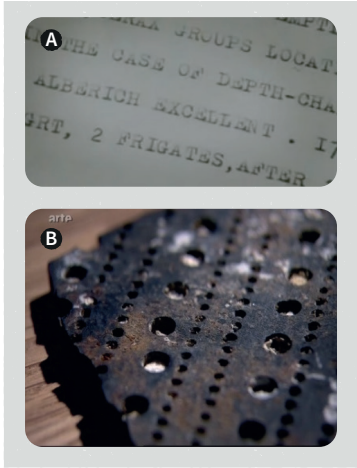


Figure 1. (A) Message Enigma sur l'U-480 après sa non détection. (B) Alberich recouvrant le sous-marin U-480 coulé en 1945 (Source : « Quand le chasseur devient la proie : le premier sous-marin furtif », les Mercredis de l'Histoire, Arte, 2008, disponible sur Dailymotion).

Derrière cette innovation se cache Erwin Walter Meyer (1899–1972) considéré comme l'un des plus grands acousticiens allemands de son temps. À la tête d'un groupe de recherche à l'Institut Heinrich-Hertz de Berlin, Meyer et son équipe ont étudié les mécanismes d'absorption du son dans l'eau, en particulier l'influence des bulles d'air dans l'eau, précurseurs des dispositifs Alberich. Ces travaux secrets constituaient un « effort de guerre ». À la fin de la guerre, Meyer se tourna vers le gouvernement britannique pour rendre ces documents accessibles au niveau international, sous forme d'une compilation des rapports de travail publiés en langue anglaise entre 1946 et 1950. Ce document reste majeur tant par la richesse des informations que par la rigueur des études menées.

Les premiers métamatériaux acoustiques

L'Alberich était donc le premier *métamatériau acoustique*, vocable qui désigne une classe de matériaux composites artificiels avec une structuration plus petite que la longueur de l'onde acoustique, leur conférant un comportement sans équivalent dans la nature. Ainsi, dans certaines bandes de fréquences, ces métamatériaux ont des propriétés acoustiques inhabituelles qui dépendent de leur structuration interne ou architecture. C'est le cas pour l'Alberich décrit ci-dessus, avec une architecture de l'ordre du millimètre mais une absorption acoustique pour des longueurs d'onde λ de l'ordre de la quinzaine de centimètres ($\lambda = c/f$, c et f étant respectivement la vitesse du son dans l'eau, soit 1 500 m/s, et la fréquence des ondes, soit vers 10 kHz).

Les métamatériaux acoustiques comme l'Alberich sont de très bons candidats pour les panneaux de revêtement utilisés en acoustique sous-marine, qui se classent en deux catégories de structuration en fonction de la taille des cavités ou inclusions : les micro-inclusionnaires (avec injection de microballons ou de particules fines dans une matrice viscoélastique*) et les macro-inclusionnaires (avec des inclusions « résonantes » dont la taille est du même ordre de grandeur que celle des métamatériaux). Ces panneaux doivent répondre à deux fonctions acoustiques : la discrétion et la furtivité.

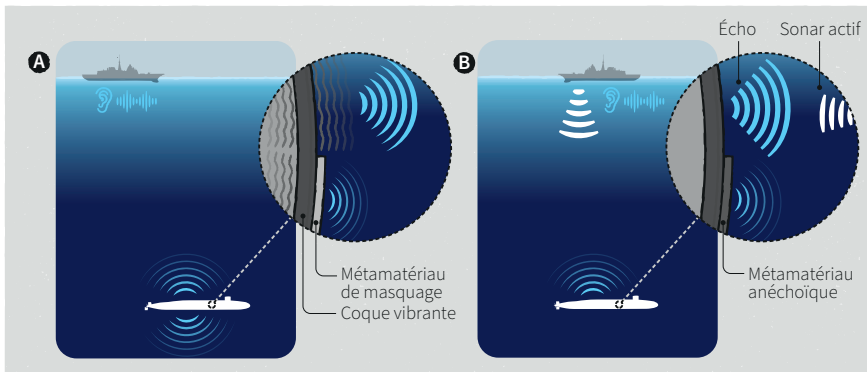


Figure 2. (A) Détection passive : pour éviter la détection par un SONAR passif, un métamériau de masquage est utilisé pour réduire le bruit rayonné par la coque. (B) Détection active : pour éviter la détection par un SONAR actif, un métamériau anéchoïque est utilisé pour réduire l'énergie réfléchi.

La discrétion est liée à la détection sous-marine passive, lorsqu'un adversaire tente d'analyser le bruit ambiant en vue de détecter et d'identifier un sous-marin ou un vaisseau (**Figure 2A**). Ce bruit a pour origine les machines du sous-marin, les propulseurs, etc. Pour éviter d'être détectés, les sous-marins sont revêtus de matériaux de masquage, qui réduisent significativement le bruit rayonné. Pour la discrétion, l'efficacité du panneau est évaluée à partir du coefficient de masquage C_M , défini comme le rapport de l'amplitude de la pression acoustique rayonnée par la coque avec revêtement, sur la pression acoustique rayonnée par la coque sans revêtement.

La furtivité est relative à la détection sous-marine active, lorsqu'un bâtiment adverse émet un signal acoustique et tente de détecter et d'analyser les échos renvoyés par les obstacles environnants, donnant des informations sur leur présence, leur localisation et leurs dimensions (**Figure 2B**). Pour éviter une telle menace, les sous-marins sont revêtus de matériaux dits anéchoïques, qui ont pour but de réduire l'énergie des ondes réfléchies. Pour la furtivité, l'efficacité

du panneau est évaluée à partir du coefficient d'anéchoïsme C_A , défini comme le rapport de l'amplitude de l'onde réfléchie sur l'onde incidente, quand la face arrière du panneau est supposée être un milieu infini et parfaitement rigide.

Si des mesures de coefficients de masquage et d'anéchoïsme peuvent être réalisées directement sur des coques revêtues, on préfère souvent exploiter des mesures de coefficients de transmission (T) et de réflexion (R) effectuées sur des panneaux plongés dans des bassins d'essais acoustiques, en pratique nettement plus aisées. Moyennant certaines hypothèses simplificatrices, les deux coefficients C_M et C_A s'expriment alors simplement en fonction de R et T :

$$C_M = \frac{T}{1 - R} ; C_A = R + \frac{T^2}{1 - R}$$

Un sujet toujours d'actualité pour des applications duales

Pour les applications défense, le challenge scientifique et technologique est de trouver des métamatériaux performants qui minimisent C_A et C_M avec des contraintes sévères en termes d'épaisseur réduite par rapport à la longueur d'onde λ (inférieure à $\lambda/30$ en discrétion et à $\lambda/10$ en furtivité). Ces matériaux doivent garder de bonnes performances en plongée (sous pression hydrostatique importante), avec un coût de fabrication raisonnable, dans un environnement marin inamical (corrosion, bio-encrassement, etc.) et sans affecter le comportement hydrodynamique du bâtiment, ni sa flotabilité. Face à l'évolution rapide des menaces en acoustique sous-marine, il est essentiel de développer de nouveaux métamatériaux couvrant des gammes de fréquence de détection plus larges et plus basses, prêts à faire face à la présence d'une multitude d'émetteurs et de récepteurs, de drones sous-marins ou de mines. C'est dans ce contexte que le développement de nouveaux métamatériaux devient une priorité stratégique, car au regard des solutions usuelles, ils permettent, avec un façonnage optimisé de leur architecture, d'élargir le spectre des solutions possibles.

Par ailleurs, depuis quinze ans, ce sujet suscite un intérêt notable pour d'autres applications en environnement marin (installation d'éoliennes offshore, enfoncement de pieux d'ancrage ou de fondation d'ouvrages, stations d'hydrocarbures à grandes profondeurs...) qui génèrent des ondes de très basses fréquences (de 0,05 à 1 kHz) néfastes pour l'écosystème. Les applications civiles profitent des avancées issues du domaine de la défense, mais ont des contraintes moins sévères (encombrement, poids, installations non mobiles...)

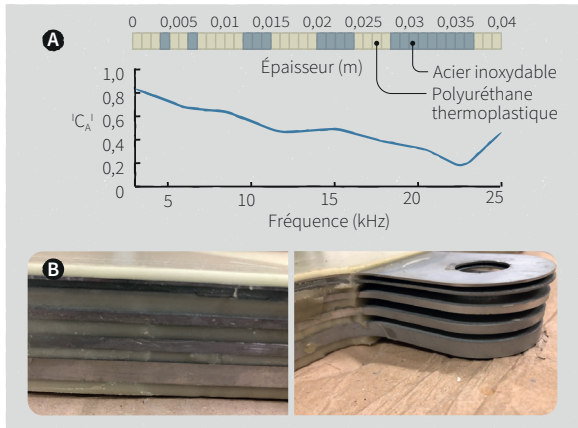


Figure 3. (A) Exemple d'une architecture d'un métamatériau fait de 40 couches en acier inoxydable et polyuréthane thermoplastique. Cette architecture a été optimisée par algorithmes génétiques de sorte à présenter un très faible coefficient anéchoïque C_A entre 3 et 25 kHz. (B) Pour vérifier son efficacité, ce panneau a été fabriqué puis testé positivement en bassin.

Actuellement, des efforts sont menés pour identifier de nouvelles stratégies d'atténuation acoustique en s'inspirant de structures complexes présentes dans des organismes vivants, telles que les architectures particulières du matériau qui forme les massues de la crevette, lui permettant de résister aux ondes de choc que cette crevette inflige à ses proies. Les métamatériaux tirent aussi profit des techniques d'impression 3D et d'optimisation de leur architecture qui permettent d'explorer de nouvelles solutions : les recherches récentes portent sur d'autres inclusions résonantes (ellipsoïdes, pyramides, à structures imbriquées) ou des arrangements pseudo-aléatoires. Par exemple, dans le cas de métamatériaux multicouches, l'utilisation de techniques numériques d'optimisation telles que les « algorithmes génétiques* » permet d'obtenir les meilleures dispositions de couches présentant un très faible coefficient d'anéchoïsme sur une large gamme fréquentielle tout en tenant compte des contraintes de fabrication. Un exemple d'architecture pertinente est donné à la **Figure 3**, qui présente une structuration sous la forme d'un gradient de propriétés structurales et mécaniques.

Cette thématique est aujourd'hui à une étape majeure par les nouveaux outils disponibles de modélisation et d'optimisation et par les nouvelles techniques de fabrication, qui permettent d'explorer un champ des possibles plus vaste, pour des métamatériaux encore plus performants.

Références

- C. Croëne, J. Vasseur, L. Roux, C. Audoly, A.-C. Hladky, « A review of acoustic metamaterials for naval and underwater defense applications: from historical concepts to new trends », *Acta Acustica*, vol. 9, 2025, article 24.

Conclusion

Au terme du voyage auquel nous vous avons conviés dans cet ouvrage, chaque matériau se révèle comme le fruit d'un long chemin de savoir-faire, de découvertes et de choix scientifiques. Même les plus familiers – béton, verre, textiles, bois... – cachent une complexité insoupçonnée. Leurs propriétés, leurs modes de fabrication et leurs usages s'articulent subtilement et les matériaux évoluent avec les connaissances, donnant le jour à des performances adaptées à nos besoins et à notre environnement.

Les propriétés des matériaux résultent toujours d'interactions multiples : elles émergent de la nature et de l'agencement des atomes ou des molécules, des microstructures qu'ils forment selon les conditions de mise en œuvre et de l'environnement dans lequel ils sont utilisés. Cette complexité fait de la science des matériaux un espace de convergence où chimie, physique et ingénierie dialoguent en permanence avec la biologie, les sciences de la Terre, l'informatique ou les mathématiques, l'économie, l'histoire... L'interdisciplinarité n'y est pas une ambition abstraite, mais une pratique quotidienne, exigeante, qui suppose de construire des langages communs entre scientifiques et de partager des outils pour penser des objets qui ne peuvent plus être appréhendés selon une seule logique disciplinaire.

Cette richesse s'accompagne de nouvelles contraintes. Les matériaux font l'objet aujourd'hui d'exigences multiples : performance, durabilité, disponibilité des ressources, recyclabilité, voire circularité, acceptabilité sociale... Il ne s'agit plus seulement d'innover ou d'optimiser, mais de composer avec des équilibres subtils : alléger sans fragiliser, améliorer les performances sans complexifier le recyclage et prolonger la durée de vie sans en compromettre la fin. Ces tensions redéfinissent en profondeur les priorités de la recherche et de l'innovation, désormais confrontées à la criticité des ressources et à l'exigence de sobriété énergétique et environnementale.

Dans les années à venir, ces arbitrages prendront une dimension encore plus concrète. Les bâtiments intégreront des matériaux intelligents, capables de s'adapter à des conditions climatiques extrêmes tout en limitant leur impact environnemental : des bétons qui s'autoréparent et captent le dioxyde de carbone ou des verres modulant la lumière et la chaleur pour

réduire le recours à d'autres sources d'énergie. Les systèmes énergétiques reposeront sur des dispositifs de conversion et de stockage performants, conçus pour être réparables et recyclables, qu'il s'agisse de batteries, de panneaux solaires ou de piles à combustible. Des implants bioinspirés interagiront de manière toujours plus fine avec les tissus vivants, ajustant leur comportement aux signaux biologiques. Dans le domaine du numérique, la quête de performance devra s'accompagner d'une réduction drastique de la consommation énergétique, impliquant de nouvelles architectures matérielles.

Ces évolutions s'appuieront sur une science en pleine mutation. La modélisation enrichie par l'intelligence artificielle permettra d'explorer rapidement des espaces de composition complexes et d'identifier des combinaisons inédites. Les techniques de caractérisation multi-échelles donneront accès, avec précision, aux dynamiques de la matière en conditions réelles. Les procédés de fabrication, de plus en plus intégrés et adaptatifs, ouvriront la voie à des architectures de matériaux jusqu'alors inaccessibles.

Malgré ces avancées, une part d'incertitude demeurera. La matière conserve sa capacité à surprendre, à résister aux modèles, à déjouer les anticipations. Cette part d'inattendu, ou sérendipité, a toujours été un moteur de découverte et d'innovation scientifiques.

Dans ce contexte, la recherche fondamentale joue un rôle essentiel. Elle inscrit les travaux dans le temps long, explore des voies encore incertaines et favorise les croisements disciplinaires indispensables à ces avancées. Au sein de ses laboratoires et avec ses partenaires, le CNRS contribue à structurer cette dynamique collective, en mobilisant une diversité de compétences et en maintenant un équilibre entre compréhension fondamentale et perspectives d'application.

Les transformations à venir ne se réduiront pas à une accumulation d'innovations. Elles devront répondre à de véritables besoins de la société. Elles engageront des choix sur les matériaux que nous produisons, utilisons et transmettons aux générations futures. Elles poseront la question de leur disponibilité, de leur réutilisation et de leur impact sur les écosystèmes et les sociétés. À cet égard, la science des matériaux ne se contente pas d'apporter des solutions : elle participe à éclairer les conditions dans lesquelles ces solutions peuvent être mises en œuvre de manière responsable en convoquant toutes les sciences.

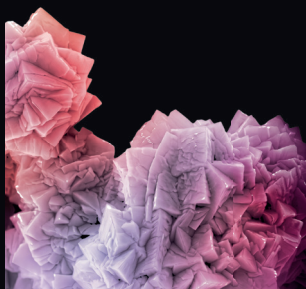
Les matériaux occupent ainsi une place singulière. Présents dans tous les aspects de notre quotidien, ils sont au cœur des transformations technologiques, mais aussi des équilibres socio-économiques, géopolitiques et envi-

ronnementaux. Leur étude et leur maîtrise ne relèvent pas seulement d'un enjeu de performance, mais aussi d'une attention à préserver durablement le monde. Dans cette aventure, le CNRS et ses partenaires scrutent sans relâche les possibles de la matière, posant les bases d'un futur façonné par la science, l'exploration et l'imagination.

Et ce futur vous attend ! Étudiantes et étudiants, c'est dans l'espoir d'éveiller votre curiosité que nous avons sollicité les auteurs et autrices de cet ouvrage pour qu'ils vous racontent leurs recherches et vous montrent la matière étonnante qu'ils façonnent, manipulent et modélisent pour découvrir les matériaux de demain.

Lionel Buchaillot, directeur de CNRS Ingénierie
Thierry Dauxois, directeur de CNRS Physique
Sandrine Sagan, directrice de CNRS Chimie

ÉTONNANTS MATÉRIAUX



Imaginer les matériaux du futur est l'un des défis que le CNRS s'est donnés pour les prochaines années, afin de répondre aux enjeux des grandes transitions de notre temps. De nombreuses disciplines se rencontrent pour concevoir des matériaux plus sobres, résistants, recyclables ou bioinspirés et éclairer leurs usages, leurs impacts et les choix qu'ils engagent.

En ce moment même, des laboratoires français, parmi les meilleurs au monde, imaginent et dessinent ces matériaux d'aujourd'hui et de demain, parfois en s'inspirant de l'observation de la nature, parfois en s'appuyant sur des connaissances acquises au fil des siècles, toujours avec l'ambition de répondre aux défis de la société.

À travers une soixantaine d'articles courts et abondamment illustrés, des chercheuses et chercheurs en chimie, physique et ingénierie racontent comment ils explorent, transforment et réinventent la matière.

L'ouvrage *Étonnants matériaux* vous plonge ainsi au cœur de métaux ultralégers, de plastiques biodégradables ou autoréparants, dans le monde du nano et à la découverte des instruments de pointe qui permettent d'y naviguer.

Ce livre, accessible à tout amateur et toute amatrice de découvertes, invite aussi à explorer les coulisses de la recherche en science des matériaux, à la croisée de l'innovation, des défis environnementaux et des usages de demain.

26 €

Prix valable en France

ISBN : 978-2-271-16072-0



www.cnrseditions.fr

01 UN LIVRE A
LE MÊME PRIX
PARTOUT

Dépôt de films minces sur un substrat en nanomatériaux carbonés, Brigitte VIGOLO / Tristan MAHEUT / Institut Jean Lamour / CNRS Images

Infographies : Antoine Dagan
Retouche photo et maquette :  Sylvain Collet