La science des matériaux, un pilier stratégique pour la société de demain

Daniel R. Neuville[1,2], René Guinebretière[1,3], Laurent Cormier[1,4], Christian Gauthier[1,5]

[1] Fédération Française des Matériaux, 23 rue du Loess, Bat. 75, 67034 Strasbourg cedex 2
[2] Geomat Lab, IPGP-CNRS-UPC, 1 rue Jussieu, 75005 Paris
[3] IRCER, Université de Limoges, 12 rue Atlantis 87068 Limoges
[4] Sorbonne Université, Muséum National d'Histoire Naturelle, UMR CNRS 7590, Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie, IMPMC, 75005 Paris, France
[5] Institut Charles Sadron- CNRS, 23 rue du Loess, BP 84047, 67034 Strasbourg Cedex 2

***Matériau** : un mot complexe qui entraîne de nombreuses questions : Qu'appelle-t-on matériau ? Quels matériaux pour demain ? Quelles recherches sur les matériaux ?*

Pour une ambition scientifique, industrielle et collective.

Depuis les premiers outils en pierre jusqu'aux matériaux les plus avancés utilisés dans les systèmes énergétiques, les composants électroniques ou les dispositifs médicaux, la maîtrise des matériaux accompagne l'histoire de l'humanité. Elle a contribué à transformer nos sociétés, à développer nos capacités techniques et à améliorer nos conditions de vie. Aujourd'hui, les matériaux sont au cœur des grandes transformations du XXI^{e} siècle. La transition énergétique, la révolution numérique, la décarbonation de l'industrie, la santé et la souveraineté technologique reposent toutes, à des degrés divers, sur notre capacité à concevoir, élaborer et maîtriser des matériaux adaptés à de nouvelles fonctions et à de nouvelles contraintes. Leur disponibilité, leur performance, leur coût, leur durabilité et leur recyclabilité conditionnent une part croissante de nos choix scientifiques, industriels et sociétaux.

La science des matériaux ne se limite donc pas à l'étude d'une famille de substances ou à une branche particulière de la physique, de la chimie ou de l'ingénierie. Elle constitue un champ scientifique transversal qui relie la composition et la structure de la matière aux procédés d'élaboration, aux propriétés et aux usages. Elle mobilise des compétences complémentaires, depuis la recherche fondamentale jusqu'au développement industriel, et contribue à faire émerger des solutions qui ne pourraient être obtenues en mobilisant une seule discipline.

La France dispose, dans ce domaine, de compétences scientifiques et industrielles reconnues. Pourtant, la transversalité même de la science des matériaux peut rendre sa représentation institutionnelle, la coordination de ses communautés et la définition de priorités communes plus difficiles. Réparties entre de nombreuses disciplines, structures de recherche et filières industrielles, les compétences ne disposent pas toujours d'une visibilité collective à la mesure de leur importance stratégique.

Ce constat appelle une réflexion collective : comment mieux fédérer les acteurs, renforcer les interactions entre recherche et industrie et donner à la science des matériaux une place plus lisible dans les orientations scientifiques et technologiques nationales ? Par son réseau de sociétés savantes, sa connaissance des communautés scientifiques et industrielles et son rôle fédérateur, la Fédération Française des Matériaux, FFM peut contribuer à cette dynamique. Au-delà de l'organisation du congrès Matériaux, elle a vocation à devenir une

force de proposition, de coordination et d'expertise collective au service d'une ambition nationale.

Des matériaux au cœur des grandes transitions

Un matériau peut être défini comme une substance utilisée pour fabriquer des objets, des structures ou des dispositifs techniques. Il s'agit d'une matière première transformée pour répondre à un besoin fonctionnel. Il y a donc, dans la notion de matériau, l'action d'un humain qui prend une roche et la taille pour en faire un biface ou une pierre tranchante. De « l'Age de bronze » à maintenant en passant par « l'Age de fer » et bien d'autres étapes, les matériaux sont omniprésents dans l'évolution de notre espèce et ont contribué grandement à son développement et à l'amélioration des conditions de vie.

Un matériau est caractérisé par un ensemble de propriétés physiques, chimiques, thermiques, mécaniques ou optiques qui rendent un objet apte à un usage donné.

Les matériaux peuvent être regroupés en grandes familles allant des plus naturels aux plus élaborés ou modifiés : bois, cuir, pierre ; métaux et alliages ; céramique, verre ; matériaux composites (fibres de carbone, béton armé…) ; polymères (plastiques, caoutchouc…).

Comme mentionné, les matériaux accompagnent l'histoire de l'humanité depuis ses origines. Il est nécessaire de pouvoir choisir le bon matériau pour la bonne fonction, innover, recycler, ou encore concevoir des objets plus durables et respectueux de l'environnement.

Le but de ce court texte n'est pas de faire une histoire détaillée des matériaux qui ont contribué à améliorer nos conditions de vie, mais quelques rappels s'imposent : la maîtrise de la taille d'une pierre entraîne de meilleures chasses et une amélioration des conditions de nutrition ; la maîtrise du feu améliore notre alimentation et permet le développement de nouveaux matériaux (agrégés et chauffés, entraînant les premiers changements de phase) ; le développement de la roue, des palans, leviers et des vis sans fin change et facilite la vie de nos ancêtres.

Tous ces changements ont été réalisés au bénéfice de notre espèce sans réel impact sur la Terre. Mais tous ont également introduit la notion de travail nécessaire pour transformer le matériau naturel en matériau utilisable. Ce terme désigne, d'un point de vue physique, la quantité d'énergie associé à la force nécessaire à cette transformation, et en sociologie ou économie, l'activité humaine associée. D'où la notion de coût du travail ou coût de transformation du matériau.

On peut imaginer, à l'origine, une certaine égalité entre les individus, chacun taillant et utilisant sa propre pierre. Puis, dans une recherche d'efficacité, une spécialisation s'installe : l'un devient tailleur, l'autre lanceur. C'est ainsi que les premières évolutions dans le domaine des matériaux ont donné naissance aux premiers corps de métier : tailleurs, forgerons, verriers, céramistes… Cette spécialisation s'est accompagnée d'un besoin croissant de transformation des matériaux, faisant appel à des sources d'énergie autres qu'humaines.

Ces changements, nécessitant de mobiliser ressources et énergie, ont eu de nombreux effets sur notre environnement terrestre : modification des paysages (mines, aqueducs, infrastructures humaines), évolution du climat, disparition d'espèces animales et végétales… Mais la Terre continue également d'évoluer quotidiennement, sous l'effet de phénomènes naturels tels que les éruptions volcaniques, les séismes ou les impacts de météorites.

Les premiers grands bouleversements dans l'histoire des matériaux sont nés grâce à la maîtrise progressive des traitements thermiques. Cette connaissance, acquise empiriquement puis scientifiquement, a permis l'élaboration des céramiques, des alliages métalliques, des

verres ou encore des aciers trempés, bien avant la révolution industrielle qui a vu l'apparition de la machine à vapeur.

Cependant, l'avènement de la machine à vapeur marque un tournant décisif : elle démultiplie la capacité humaine à transformer la matière et l'environnement. Là où il fallait jadis des centaines de bras, une seule machine suffisait désormais. Ce changement technologique, moteur de l'essor industriel, a favorisé une accélération sans précédent dans le développement et l'usage de nouveaux matériaux.

Mais cette évolution a un coût : elle est aussi à l'origine d'une hausse massive des émissions de gaz à effet de serre et d'un bouleversement climatique planétaire. Ainsi, si la machine à vapeur n'est pas à l'origine des matériaux modernes, elle a profondément modifié les rythmes, les échelles et les impacts de leur transformation.

Les cinquante dernières années ont vu une accélération sans précédent dans la conception, la fabrication et l'utilisation des matériaux. On est passé d'un usage classique des matériaux traditionnels (métaux, céramiques, verres, polymères) à une approche fonctionnelle, où le matériau est conçu pour répondre à des propriétés ciblées : optiques, mécaniques, électroniques, thermiques, etc. Plus récemment encore, une logique systémique et durable s'impose, intégrant recyclabilité, impact environnemental, énergie grise, criticité des ressources…

Pour résumer :

– Les années 1970–1990 ont vu l'essor des matériaux composites, des céramiques avancées et des alliages à hautes performances, en réponse aux besoins de l'aéronautique, du spatial et de la mécanique de précision.

– Les années 1990–2010, marquées par les suites du choc pétrolier et les exigences d'efficacité énergétique, voient l'émergence des nanomatériaux, des supraconducteurs à haute température critique, des matériaux photoniques, mais aussi la miniaturisation accélérée des composants électroniques, exprimé par la loi de Moore. Cette dynamique, fondée sur le doublement régulier de la densité des transistors, repose étroitement sur la mise au point de matériaux structurés à l'échelle nanométrique.

– Depuis les années 2010, dans un contexte de transition écologique et numérique, chercheurs et industriels développent des matériaux dits "verts" ou vertueux (biosourcés, recyclables, à faible impact carbone), des matériaux bio-inspirés, intelligents ou auto-cicatrisants, des matériaux 2D (comme le graphène), ainsi que des matériaux pour les technologies clés : batteries, hydrogène, photovoltaïque, électronique souple. L'échelle de Moore devient alors non seulement une contrainte physique, mais aussi un levier d'innovation, en lien avec la modélisation numérique, l'intelligence artificielle et le traitement massif des données.

Une science transversale, de la compréhension fondamentale à la conception

Aujourd'hui, la recherche sur les matériaux est pluridisciplinaire, à la croisée de la physique, de la chimie, des surfaces et interfaces, de l'ingénierie, de l'environnement, de la biologie et des géosciences.

Les grandes avancées reposent sur des études *in situ* ou *operando* grâce au développement d'outils d'observation en temps réel (source de rayonnement synchrotron, microscopies électroniques, spectroscopies avancées), pour comprendre les mécanismes à l'échelle atomique et les relier aux propriétés macroscopiques des matériaux en cours d'élaboration. Ces outils permettent aussi de développer des matériaux de façon prédictive, avec modélisation multi-échelle et intelligence artificielle, prévision des propriétés avant la

synthèse, et conception à rebours par design inverse : on définit une fonction recherchée, puis on remonte vers la composition et la structure.

Grâce à ces outils numériques et aux bases de données, on analyse en temps réel des milliers d'informations et on imagine de nouveaux matériaux. Parmi les grandes avancées : matériaux à mémoire de forme et intelligents (biomédical, aéronautique), matériaux pour électronique flexible et adaptative (OLED, écrans pliables, capteurs portables, fibres multimodales), matériaux pour la transition énergétique (électrolytes solides, batteries Li-ion, Na-ion, catalyseurs pour l'hydrogène, matériaux thermochromes).

Aujourd'hui, un matériau n'est plus seulement une substance, c'est un ensemble fonctionnel, souvent multi-échelle, multi-composé, intégré dans un cycle de vie. Il combine des éléments chimiques structurés à différentes échelles, conçus pour répondre à des fonctions spécifiques dans un environnement donné, tout en intégrant un impact sociétal (durabilité, recyclabilité…). On parle de matériaux intelligents, adaptatifs, circulaires ou augmentés par le numérique.

Comme nous venons de le voir, les matériaux, leurs histoires, leurs évolutions et leurs avenirs sont intimement liés à l'histoire et au développement de l'humanité. Mais quels sont les moyens actuels dont disposent les chercheurs, enseignent-chercheurs, ingénieurs R&D pour développer les matériaux de demain ?

Le paradoxe français : une excellence scientifique à mieux fédérer

À l'heure de la transition énergétique, où le développement des matériaux est un atout clé, il est nécessaire de comparer les moyens disponibles en France avec ceux de nos voisins européens ou américains.

En France, la recherche en matériaux est structurée par les instituts du CNRS, qui reproduisent peu ou prou les grandes disciplines académiques (physique, chimie, etc.). A l'intérieur de ce découpage, les différents champs scientifiques correspondent à des sections CNRS ou CNU. Cela découle de la formalisation historique des champs scientifiques en France, où les grandes disciplines ont été institutionnalisées très tôt, au détriment de champs transversaux comme la science des matériaux.

Cela pose la question du positionnement de la science des matériaux : est-ce de la physique appliquée ? de la chimie du solide ? de l'ingénierie ? ou des géosciences (ressources) ? Cette complexité nuit à la reconnaissance d'un champ autonome. Il n'existe pas non plus de lobbying institutionnel : contrairement à d'autres domaines, la science des matériaux ne dispose pas d'une représentation collective suffisamment structurée capable de défendre ses intérêts et promouvoir sa visibilité auprès des institutions académiques ou politiques.

En France, la dualité entre recherche fondamentale et appliquée joue en défaveur des matériaux. En conséquence, malgré une recherche excellente et reconnue internationalement, la science des matériaux est dispersée dans toutes les disciplines, ce qui nuit à sa visibilité, fragmente les moyens et limite les synergies. Cela entraîne aussi une sous-représentation institutionnelle qui nuit à la structuration de notre communauté et à l'émergence de grands projets de recherche.

En Europe et en Amérique du Nord, les approches sont plus pragmatiques. Les matériaux y sont considérés comme un champ disciplinaire et stratégique à part entière.
– Le programme Horizon Europe ou l'ERC identifient les matériaux avancés comme un axe stratégique.
– Certains pays (Allemagne, Pays-Bas, Suède) disposent d'instituts nationaux des matériaux ou de centres d'excellence.

– Aux États-Unis, les « Materials Science and Engineering Departments » sont courants (MIT, Stanford, UC Berkeley…), et la « National Science Fondation » possède un programme autonome pour les matériaux.

– Les MRSECs (Materials Research Science and Engineering Centers) soutiennent les recherches interdisciplinaires sur les matériaux.

La Fédération Française des Matériaux : une force de proposition au service des transitions

Depuis plus de vingt ans, la Fédération Française des Matériaux, FFM, joue un rôle central dans la structuration de la communauté académique et industrielle des matériaux en organisant le congrès, *Matériaux*, qui rassemble plus de 1500 participants à chaque édition. Elle fédère aujourd'hui 26 sociétés savantes couvrant l'ensemble des grandes familles de matériaux (métaux, verres, polymères, céramiques, composites, géomatériaux, etc.) et représente une structure faîtière unique en Europe.

Malgré ce positionnement stratégique, la FFM reste un levier largement sous-exploité.

Or, dans un contexte de transition énergétique et écologique, où les enjeux liés aux matériaux sont cruciaux, la FFM a toutes les capacités pour devenir une instance de coordination, de proposition et de service, au carrefour des acteurs scientifiques, industriels et institutionnels. Elle peut contribuer à :

- Structurer la recherche interdisciplinaire autour des matériaux durables ;
- Proposer des feuilles de route nationales en lien avec le CNRS, l'ADEME, l'ANR, les ministères concernés et l'Académie des sciences ;
- Soutenir les politiques publiques par une expertise collective indépendante ;
- Faciliter le dialogue entre les disciplines, les secteurs industriels et les décideurs.

La FFM témoigne de l'existence d'une communauté forte, dynamique, et prête à s'engager. Elle constitue un socle crédible pour bâtir une structuration officielle, capable d'anticiper les besoins scientifiques, technologiques et sociétaux à venir.

Une opportunité stratégique pour la France

Répondre aux défis du XXI^{e} siècle impose de concevoir des matériaux intégrés dans une logique de cycle de vie vertueux, depuis leur élaboration jusqu'à leur réutilisation ou valorisation. Cela nécessite des structures de recherche, d'innovation et de coordination adaptées. La FFM est prête à jouer ce rôle : celui d'un catalyseur des énergies collectives, d'un interlocuteur des institutions, et d'un moteur pour la construction d'une politique ambitieuse des matériaux en France et en Europe.

Une initiative éditoriale pour valoriser la communauté

L'édition 2026 du congrès Matériaux est l'occasion pour la FFM d'initier une série d'articles dans des revues francophones destinées à la communauté scientifique. Ces publications paraîtront dans Matériaux & Techniques, L'Actualité Chimique et Reflets de la Physique. La FFM remercie les comités éditoriaux de permettre à cette communauté de partager ses connaissances et de faire connaître la diversité des recherches sur les matériaux.

Dans ce numéro spécial de Matériaux & Techniques, trois articles illustrent cette diversité : les matériaux métalliques, présentés par Valérie Paul-Boncour ; la carbonisation ionothermale de biomasse lignocellulosique, de l'ingénierie ionique aux carbones nanostructurés, par Soha Aldroubi et ses coauteurs ; et les céramiques avancées, de la chimie des matériaux aux applications stratégiques, par Cécile Pagnoux et ses coauteurs.

Nous espérons que ces contributions apporteront aux lecteurs des éclairages complémentaires sur ces familles de matériaux et donneront envie d'explorer les nombreuses interactions qui relient leurs propriétés, leurs procédés d'élaboration et leurs applications. Au-delà de leur diversité, elles témoignent de la vitalité d'une communauté dont la capacité à coopérer constitue un atout majeur pour répondre aux défis de demain.