

Scientific Perspectives, Humanities and Research

Perspectives scientifiques,
sciences humaines
et recherche

Quels challenges pour les nanotechnologies ?

Nicolas Vukadinovic

Les nanotechnologies sont souvent présentées comme un nouveau territoire riche de promesses et à même de révolutionner à terme notre quotidien en impactant les piliers de notre société que sont la santé, le climat, l'énergie, les communications ou encore la sécurité. Après un rapide tour d'horizon des tendances actuelles et futures dans différents secteurs applicatifs, deux domaines font l'objet d'une analyse plus détaillée, à savoir la sécurité, par le biais de l'authentification, et le changement climatique.

Les nanotechnologies peuvent être définies comme un champ multidisciplinaire visant à la création de matériaux, de dispositifs et de systèmes par la manipulation de la matière à l'échelle nanométrique, en exploitant les nouveaux phénomènes apparaissant à cette échelle. Le périmètre des nanotechnologies est donc très vaste¹, et celles-ci diffusent dans de nombreux secteurs industriels, tant civils que militaires. La présente communication a pour objectif de mettre en exergue quelques tendances fortes relatives aux nanotechnologies.

Rapide panorama des principaux axes de recherche en nanotechnologies

Les progrès réalisés depuis une vingtaine d'années ont permis d'identifier les domaines où les nanotechnologies peuvent avoir un impact décisif. Loin d'être exhaustive, la liste suivante donne un aperçu de la variété des applications envisagées en s'appuyant sur une analyse publiée récemment².

Les nanomatériaux

Les nanomatériaux sont au cœur des nanotechnologies. Un nanomatériau est défini comme ayant au moins l'une de ces dimensions comprises entre 0,1 et 100 nm. Les nanomatériaux regroupent de nombreux sous-systèmes, parmi lesquels : les matériaux nanostructurés, les nanoparticules (incluant notamment les nanofibres*, les nanotubes* et les nanocapsules*), les films ultra-minces, les boîtes quantiques (nanostructures semi-conductrices encore appelées « quantum dots »), les nanocomposites* et les matériaux nanoporeux*. Ces nanomaté-

riaux sont à la base de nouveaux dispositifs électroniques, optiques et mécaniques.

La fabrication à grande échelle de nanosystèmes avec une précision atomique

Il s'agit de mettre au point des procédés de fabrication permettant de construire des architectures atomiques, moléculaires, ou des nanoobjets à 2D ou 3D sur des dimensions macroscopiques avec une précision atomique. Ces procédés peuvent provenir d'une approche « top-down* » (lithographie, gravure, nano-impression) ou d'une approche « bottom-up* » mettant en jeu des processus thermodynamiques issus de la nature (synthèse chimique, auto-assemblage). À terme, une solution alternative pourrait être une extension des techniques de fabrication additive avec une résolution nanométrique. Des imprimantes 3D dotées d'une résolution spatiale de l'ordre de 200 nm commencent à être commercialisées.

Les nanocapteurs

Il s'agit de dispositifs ultra-miniaturisés permettant d'acquérir des informations en temps réel sur un environnement ou une personne. Outre la miniaturisation, l'apport des nanotechnologies se situe au niveau de la sensibilité extrême de ces capteurs, de leur sélectivité, de leur faible consommation énergétique, de leur capacité à communiquer et de leur possible intégration dans des systèmes inertes ou vivants. Le champ d'applications est immense. Citons par exemple : la détection de polluants, les textiles intelligents (permettant notamment l'analyse de l'état physiologique du porteur du

vêtement grâce à un réseau de capteurs intégrés à la fibre textile), ou encore le contrôle de santé de pièces pour l'automobile et l'aéronautique.

Les systèmes de récupération, de stockage et de gestion de l'énergie

La problématique est ici d'utiliser les nanotechnologies pour transformer l'énergie disponible dans l'environnement (solaire, thermique, mécanique, chimique,...) en énergie électrique, de la stocker puis de la gérer au mieux afin d'alimenter des systèmes autonomes.

Les supercalculateurs

La construction de supercalculateurs exaflopiques* avec une consommation énergétique la plus faible possible bénéficie également de l'apport des nanotechnologies (processeurs issus de la nanoélectronique, densité de stockage basée sur des éléments nanomagnétiques).

L'ordinateur quantique

Dans le cas d'un ordinateur quantique, l'information est stockée sur des « quantum bits » (« qubits ») présentant une infinité d'états, contrairement aux bits des ordinateurs classiques reposant uniquement sur deux états possibles. Les nanotechnologies interviennent au niveau du choix des systèmes physiques pour réaliser ces « qubits » (circuits supraconducteurs à jonction Josephson*, condensats de Bose-Einstein*, boîtes quantiques, cavités optiques résonnantes, spintronique*).

Les modélisations et métrologies multi-échelles

Il s'agit d'un axe transverse au domaine des nanotechnologies. La conception de nouveaux matériaux et dispositifs nanotechnologiques repose sur la capacité à prévoir le comportement macroscopique de ces entités à partir de leurs caractéristiques aux échelles inférieures (microscopiques, mésoscopiques). Le défi est alors de développer des modèles multi-échelles intégrant les informations essentielles propres à chaque échelle. Ces modèles dépendent de paramètres qui doivent être soit identifiés expérimentalement (mesures spectroscopiques), soit justifiés par des calculs ré-

alisés à l'échelle inférieure. Cette démarche apparaît comme un des enjeux majeurs dans le développement des nanotechnologies.

La médecine régénérative et l'ingénierie moléculaire

Sur ce thème, les nanotechnologies peuvent être utilisées à différentes fins. Un premier exemple est la fabrication d'assemblages nanométriques bio-compatibles pour réparer ou remplacer des tissus biologiques endommagés. Une autre application est la vectorisation de médicaments par le biais de nanoparticules magnétiques permettant de cibler le traitement sur les tumeurs sans affecter les tissus sains environnants.

Nous poursuivons ce panorama en nous focalisant sur deux thématiques ayant potentiellement un fort impact sociétal.

L'authentification en tant qu'élément de sécurité

Les nanotechnologies peuvent également révolutionner le domaine de l'authentification des objets, et donc permettre de lutter efficacement contre la contrefaçon. Le marché associé à la contrefaçon est estimé à environ 10% de tous les biens vendus dans le monde³. La mise au point de marqueurs nanométriques, non reproductibles et aisément détectables par des capteurs mono ou multi-paramétriques constitue le challenge dans ce domaine. Plusieurs solutions ont été proposées récemment pour développer des « Physically Unclonable Functions » (PUFs). Une première voie consiste à réaliser des objets nanométriques présentant un fort degré d'ordre. À titre d'exemple, on peut citer la fabrication d'un réseau de nanospirales d'or par lithographie électronique^{4,4} (Fig. 1). Le phénomène physique mis en jeu est le phénomène non linéaire de génération d'harmonique. Éclairées par un rayonnement infrarouge, les spirales émettent une lumière bleue dans le domaine visible. Cette signature optique peut être détectée par un lecteur de code barre. Une autre voie est basée sur la notion de désordre induit volontairement ou existant naturellement au sein des nanoobjets. Le premier cas peut être illustré par la réalisation d'un matériau semi-conducteur

2D (dichalcogénure de métal de transition*) dont l'épaisseur varie spatialement et de façon aléatoire⁵. L'émission de lumière dépendant de l'épaisseur du matériau, il est ainsi possible d'obtenir un réseau aléatoire dont certaines régions vont émettre de la lumière, et d'autres non, sous l'action d'un faisceau laser donnant lieu à une signature optique là encore unique. Dans le second cas, on peut citer l'exploitation des défauts structuraux existant au sein des nanotubes de carbone (NTC) et liés à leur procédé de fabrication. La présence de ces défauts modifie leur conductance électrique et leur confère une caractéristique unique. On peut alors imaginer d'accroître la complexité du système en utilisant non pas un seul NTC mais une collection de NTCs ayant chacun leur propre conductance. Dans cet esprit, un dispositif a été récemment proposé, consistant à insérer de façon aléatoire des NTCs dans un réseau de paires d'électrodes⁶. La mesure du courant électrique aux bornes de ces électrodes permet d'obtenir une signature électronique extrêmement difficile à copier. Les nanotechnologies peuvent également permettre d'accroître la robustesse de la technique d'holographie largement utilisée actuellement dans la lutte contre la contrefaçon. L'utilisation de pixels nanostructurés permet en effet de contrôler non seulement la phase mais également l'amplitude de la lumière⁷. De façon générale, la capacité à produire ces PUFs en quantité industrielle et à moindre coût sera un critère décisif quant au choix de la nanotechnologie à retenir. Enfin, il faut noter qu'une application duale est la génération de clés cryptographiques a priori infalsifiables.

Les nanotechnologies et le changement climatique

La lutte contre le changement climatique est devenue une priorité. Dans ce contexte, quel rôle peuvent jouer les nanotechnologies ? Sans apporter de solution miracle, les nanotechnologies peuvent contribuer de multiples manières, directes ou indirectes, à la limitation de la production de gaz à effet de serre. Nous allons en donner quelques exemples.

L'allègement des véhicules par l'emploi de matériaux nano-composites

L'utilisation de matériaux composites incluant des particules nanométriques (par exemple des NTCs) permet d'alléger les véhicules (automobiles, avions) et donc de réduire leur consommation en carburant (une réduction de masse de 10% s'accompagne d'une réduction de consommation de carburant d'environ 10%).

La fonctionnalisation des surfaces

Il s'agit d'appliquer à la surface d'un objet un revêtement nanométrique afin de lui conférer de nouvelles propriétés. On peut citer l'exemple de films glaciophobes qui limitent l'accrétion du givre à la surface de pièces aéronautiques, diminuant de ce fait l'énergie nécessaire pour dégivrer ces pièces et donc la consommation énergétique globale de l'avion⁸.

L'amélioration de l'efficacité énergétique des carburants

C'est le domaine de la nanocatalyse*. L'incorporation de particules nanométriques (par exemple des particules d'oxyde de cérium stockant l'oxygène⁹) dans les carburants peut améliorer significativement leur efficacité énergétique et ainsi réduire leur consommation.

L'amélioration de l'isolation thermique des habitations

Les matériaux nanostructurés sont des candidats à fort potentiel pour remplir cette fonction. Un exemple remarquable est celui des matériaux aérogels, qui sont des matériaux poreux constitués essentiellement d'air (99%) et d'un squelette rigide. Ces matériaux ultralégers sont d'excellents isolants thermiques et permettent de lutter efficacement contre la déperdition énergétique des habitations¹⁰.

Les énergies renouvelables

Les nanotechnologies visent à améliorer la production d'énergies renouvelables tout en minimisant la quantité de matière utilisée. Concernant l'énergie solaire, les boîtes quantiques permettent d'augmenter le rendement des cellules photovoltaïques des panneaux

solaires¹¹. L'énergie éolienne peut également bénéficier des nanotechnologies. L'allègement des pales à l'aide de matériaux nanocomposites ainsi que la réduction des frottements par l'emploi de lubrifiants à base de nanoparticules permet de mettre en mouvement les éoliennes pour une plus faible vitesse de vent. Par ailleurs, l'adjonction de revêtements anti-adhésion permet de protéger les pales et de réduire les périodes d'arrêt des éoliennes pour maintenance. Enfin, les nanotechnologies interviennent dans la production et le stockage de l'hydrogène dans le contexte du développement des piles à combustible. On peut citer l'exemple de nanoparticules de platine ou d'alliage platine-cobalt en tant que catalyseurs pour l'électrolyse de l'eau en hydrogène¹².

Les batteries et supercondensateurs

Une intense activité de recherche est consacrée aux améliorations de la puissance et de la durée de vie des batteries, notamment dans l'optique des véhicules électriques ou hybrides. À titre d'exemple, l'utilisation d'électrodes nano-structurées, notamment à base de NTCs, permet d'augmenter les performances des batteries Li-ion¹³. Les supercondensateurs sont des dispositifs capables de stocker l'énergie électrique, de se charger et de se décharger très rapidement. L'incorporation de graphène, plan mono-atomique constitué d'un réseau hexagonal d'atomes de carbone, permet d'augmenter très significativement la capacité de stockage d'énergie des supercondensateurs¹⁴.

La purification de l'eau

Le changement climatique modifie la répartition géographique des sources d'eau ainsi que leur provenance (orages, tempêtes, inondation). Il est alors nécessaire de mettre au point des procédés de purification de l'eau pour que l'eau potable soit accessible à la plus large population possible. Trois filières nanotechnologiques apparaissent prometteuses¹⁵ : l'adsorption par des nanoparticules présentant une très forte surface spécifique (par exemple les CNTs), les membranes incorporant des nanomatériaux (par exemple TiO₂ ou CNTs) ou bio-mimétiques, et les nano-photo-cataly-

seurs (par exemple TiO₂).

Ces différents exemples montrent que les nanotechnologies peuvent proposer des solutions pour lutter contre le réchauffement climatique. Toutefois, une vision uniquement centrée sur leurs potentiels technologiques est insuffisante. Une analyse globale doit être effectuée prenant en compte la pérennité des matériaux de base utilisés, le coût de production de ces nanotechnologies (et notamment le passage à l'échelle industrielle), leur cycle de vie (et en particulier le recyclage de ces nano-composants) ainsi que les éventuels problèmes de toxicité.

Conclusion

Les nanotechnologies sont omniprésentes au niveau des laboratoires de recherche où elles constituent un champ d'investigation pluridisciplinaire très concurrentiel. De multiples produits industriels bénéficieront à bénéficier naturellement de ces avancées dans les secteurs-clés que sont la santé, le changement climatique, l'énergie, les technologies de l'information ou encore la sécurité. Toutefois, cet enthousiasme doit être tempéré par les difficultés de déploiement à l'échelle industrielle (disponibilité des matériaux de base, reproductibilité, coût, cycle de vie). À celles-ci s'ajoutent des préoccupations sociétales sur les risques potentiels associés aux nanotechnologies qui doivent être également prises en compte. Ces différentes contraintes se traduisent actuellement par une diffusion progressive des nanotechnologies au sein de la société, même si des perspectives de ruptures technologiques existent.

¹ M. WAUTELET, *Les nanotechnologies*, Paris, Dunod, 2014.

² A. M. IONESCU, « Nanotechnology and global security », *Connections* 15(2), 2016, 31-47.

³ « Fighting counterfeiting at the nanoscale », *Nature Nanotechnology* 14(6), 2019, 497.

⁴ R. B. DAVIDSON II, J. I. ZIEGLER, G. VARGAS, S. M. AVANESYAN, Y. GONG, W. HESS et R. F. HAGLUND JR., « Efficient forward second-harmonic generation from planar Archimedean nanospirals », *Nanophotonics* 4(1), 2015, 108-113.

⁵ A. ALHARBI, « Physically unclonable cryptographic primitives by chemical vapor deposition of layered MoS₂ », *ACS Nano* 11, 2017, 12772-12779.

⁶ E. BURZURI, D. GRENADOS et E. M. PEREZ, « Physically unclonable functions based on single-walled carbon nanotubes:

a scalable and inexpensive method toward unique identifiers », *ACS Appl. Nano. Mater* 2(4) 2019, 1796-1801.

⁷ K. T. P. LIM, H. LIU, Y. LIU et J. K. W. YANG, « Holographic colour prints for enhanced optical security by combined phase and amplitude control », *Nature Communications* 10(1), 2019, 25.

⁸ H. SOUJOUJI, M. WANG, N. D. BOSCHER, G. H. MCKINLEY et K. K. GLEASONNA, « Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces », *Soft Matter* 12, 2016, 1938-1963.

⁹ T. MONTINI, M. MELCHIONNA, M. MONAI et P. FORNASIERO, « Fundamentals and catalytic applications of CeO₂-based materials », *Chem. Rev.* 116(10), 2016, 5987-6041.

¹⁰ P. C. THAPLIYAIL & K. SINGH, « Aerogels as promising thermal insulating materials: an overview », *Journal of Materials*, 2014, 127049.

¹¹ J. WU & Z. M. WANG (eds), *Quantum dot solar cells*, New York, Springer, coll. « Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology », 2014.

¹² L. CHONG, J. WEN, J. KUBAL, F. G. SEN, J. ZHOU, J. GREELEY, M. CHAN et H. BARKHOLTZ, « Ultralow-loading platinum-cobalt fuel cell catalysts derived from imidazolate

frameworks », *Science* 362(6420), 2018, 1276-1281.

¹³ B. J. LANDI, M. J. GANTNER, C. D. CRESS, R. A. DILEO et R. P. RAFFAELE, « Carbon nanotubes for lithium ion batteries », *Energy and Environmental Science* 2(6), 2009, 638-654.

¹⁴ M. HORN, B. GUPTA, J. MCLEOD, J. LIU et N. MOTTA, « Graphene-based supercapacitor electrodes: addressing challenges in mechanisms and materials », *Current Opinion in green and Sustainable Chemistry* 17, 2019, 42-48.

¹⁵ X. QU, P. J. J. ALVAREZ et Q. LI, « Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment », *Water Research* 47(12), 2013, 3931-3946.

Glossaire

Nanofibres : nanomatériaux de forme très allongée.

Nanotubes : nanomatériaux de forme cylindrique, creuse et fermée.

Nanocapsules : nanomatériaux de forme ovoïdale, creuse et fermée.

Nanocomposites : matériaux solides multiphasés dont l'une des phases a une dimension inférieure à 100 nm.

Nanoporeux : matériaux possédant des pores de taille nanométrique.

Top-down : approche descendante visant à fabriquer des nanoobjets par réduction de taille d'un matériau jusqu'à l'échelle nanométrique.

Bottom-up : approche ascendante visant à fabriquer des nanoobjets à partir de constituants élémentaires, atomes ou molécules.

Exaflopique : qualifie une puissance de calcul correspondant à un milliard de milliards d'opérations à virgule flottante par seconde.

Jonction Josephson : circuit constitué par deux matériaux supraconducteurs séparés par un matériau isolant de taille nanométrique.

Condensat de Bose-Einstein : objet quantique caractérisé par un comportement collectif de certaines particules constitutives (bosons).

Spintronique : discipline scientifique qui étudie et exploite la propriété quantique du spin de l'électron.

Lithographie électronique : technique de gravure utilisant un faisceau d'électrons ayant une résolution spatiale de l'ordre du nanomètre.

Dichalcogénure de métaux de transition : composé de formule générale MX₂ ou M=Molybdène, Étain,... ; X=Soufre, Sélénium,...

Nanocatalyse : modification de la vitesse d'une réaction chimique sous l'influence d'une substance de taille nanométrique.

Li-ion : lithium-ion.

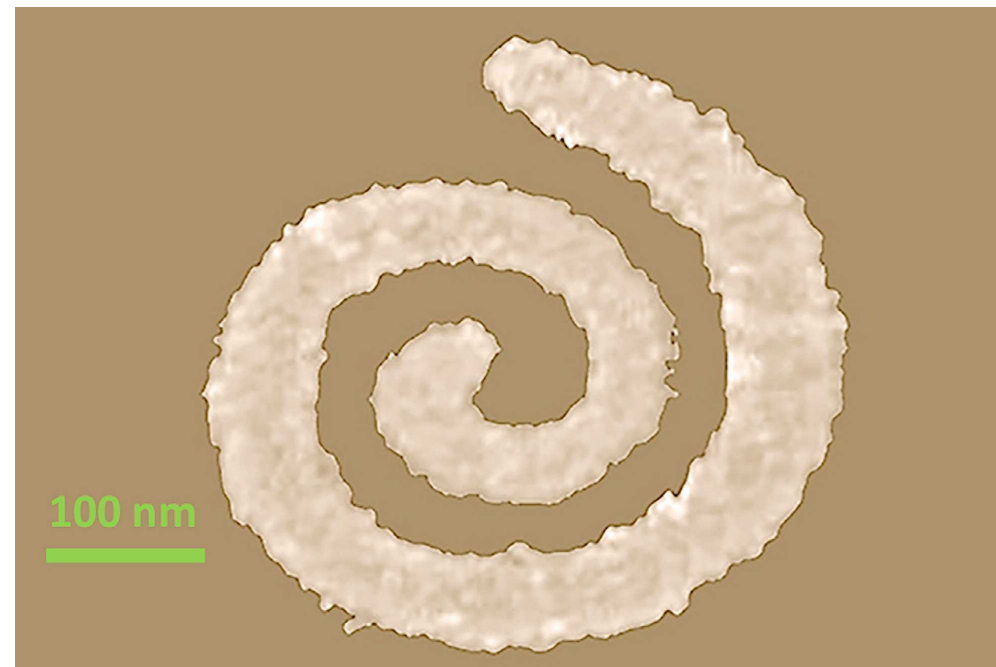


Fig. 1. Exemple d'une solution nanotechnologique pour lutter contre la contrefaçon. Nanospirale en or fabriquée par lithographie électronique correspondant au motif élémentaire d'un réseau générant une réponse optique unique dans le domaine visible sous l'éclairage d'un faisceau laser infrarouge (d'après R. B. DAVIDSON *et al.*).