

nan 2030

LES NANOMATÉRIAUX MANUFACTURÉS À L'HORIZON 2030

*Conséquences en santé-sécurité au travail
dans les PME-TPE en France*





LES NANOMATÉRIAUX MANUFACTURÉS
À L'HORIZON 2030

*Conséquences en santé et sécurité au travail
dans les petites entreprises en France*

Exercice coordonné par
Myriam Ricaud et Stéphanie Devel (INRS)

Avis au lecteur

La prospective n'est pas une prédiction de l'avenir
Elle n'est pas non plus une prévision qui serait
le prolongement des tendances passées.

La prospective prend en compte les tendances
et les discontinuités pour décrire des futurs possibles
et assurer une aide à la prise de décision

Les scénarios proposés dans ce recueil sont
le fruit d'un travail collectif. Ils ne préjugent en rien
des opinions et souhaits des participant(e)s
aux différents groupes de travail qui ont collaboré
à la rédaction des documents.

Sommaire

■ Mot du président et du vice-président du CA de l'INRS	7
■ Mot du directeur général de l'INRS	9
■ Méthodologie de la démarche	11
■ Éléments de contexte	15
■ Fiches variables	21

RECHERCHE & DÉVELOPPEMENT / PRODUCTION

● La nature et les propriétés des nanomatériaux	21
● Les technologies et les procédés	29
● Les investissements publics et privés	33
● Le transfert technologique	43
● Les réseaux de compétences	51
● L'éducation et la formation	59
● Le tissu industriel	67
● L'organisation de la production	73

POLITIQUE / RÉGULATION

● La volonté politique française et européenne	77
● La géopolitique	83
● L'encadrement juridique	89
● Les standards et les normes de marché	97

MARCHÉS

● Le bâtiment et les travaux publics	109
● La chimie et la plasturgie	113
● L'emballage	119
● La santé et la pharmacie	123
● La cosmétique	129
● L'agroalimentaire	137
● L'énergie	143
● L'environnement	151
● Le textile	159
● Le transport	165
● L'électronique	173
● La défense	181

INTERACTIONS SCIENCES ET SOCIÉTÉ

- La diffusion des informations et des connaissances 191
- Les parties prenantes 199
- L'éthique et les valeurs sociales 207

RISQUES

- Les risques pour la santé 217
 - Les risques pour l'environnement 225
 - La maîtrise des risques 233
 - Le cycle de vie et la gestion des déchets 237
- Les scénarios..... 241
- Les impacts en santé et sécurité au travail en France
dans les petites entreprises et les conséquences
sur le besoin en prévention 259

Mot du président et du vice-président du CA de l'INRS

Le rapport « *Quelle France dans dix ans ?* », publié en juin 2014 par France Stratégie, propose 33 objectifs à atteindre dans une perspective à 10 ans.

Parmi ceux-ci, des considérations d'ordre économique ou technique comme :

- rejoindre le groupe des pays européens leaders pour l'innovation,
- porter à 50 % la part des PME innovantes,
- porter la R&D des entreprises à 2 % du PIB.

Mais aussi, des éléments de contexte comme :

- être parmi les 10 pays de l'OCDE dans lesquels on vit le mieux,
- rejoindre le premier tiers des pays européens pour la satisfaction des salariés quant à leurs conditions de travail.

Quand l'INRS a fait le choix d'un sujet de prospective consacré à la production et à l'usage des nanomatériaux dans les petites entreprises à l'horizon 2030 et ses conséquences en matière de prévention des risques professionnels, les consultations pour l'établissement du rapport de France Stratégie n'étaient pas commencées. Mais le choix de ce deuxième exercice mené à l'institut s'est inscrit clairement dans la volonté exprimée depuis plusieurs années de la part de son conseil d'administration de disposer de données d'aide à la décision pour le choix des orientations de l'institut à moyen terme.

Dès lors, il était logique que l'analyse des besoins effectuée à cette occasion correspondît partiellement à celle, certes plus généraliste, qu'effectueraient ensuite d'autres experts mobilisés pour le rapport au Président de la République.

La question de la prévention des risques professionnels des nanomatériaux manufacturés, objets d'innovation par excellence, dans les plus petites structures, qu'elles soient de recherche ou de production ou qu'elles mettent en œuvre ces produits, entre en effet pleinement dans les problématiques soulevées par le rapport de France Stratégie : innovation, en particulier dans les plus petites entreprises, et respect de la personne humaine, tout d'abord au poste de travail, mais aussi à travers la conception de produits sans risques pour l'environnement.

Pour cet exercice, et comme très probablement pour ceux qui viendront, le travail associe des experts de différentes disciplines, comme les règles de l'art de la prospective l'imposent, et a été mené avec plusieurs partenaires (AISS, Anses, Carsat Alsace-Moselle, École des Ponts ParisTech, Institut Jean Lamour, InVS, Suva, université de Bretagne-Sud) comme le veut la logique de la bonne insertion de l'INRS dans le réseau des acteurs de la prévention des risques professionnels, tant au niveau français qu'à l'échelon européen.

Nous remercions donc tous les experts et intervenants dans ces travaux, ainsi que toute l'équipe qui a préparé depuis de nombreux mois ce séminaire et nous vous souhaitons un séminaire très fructueux.

Jean-François Naton, président du CA de l'INRS
Marc Veyron, vice-président du CA de l'INRS

Mot du directeur général de l'INRS

Lors du lancement du premier exercice de prospective initié par l'INRS, j'ai beaucoup insisté, en tant que directeur général, sur la nécessité pour l'INRS de réaliser ces exercices de prospective et d'adopter une méthode bien définie et robuste qui garantisse la traçabilité des étapes successives de la démarche et des résultats. Il me semblait indispensable que, dans un institut qui a fait de la rigueur scientifique l'épine dorsale de son activité, une étude prospective adoptât les mêmes principes.

Au-delà des aspects factuels de la définition des variables, de la détermination des points de rupture et discontinuités, de la combinaison des hypothèses pour parvenir à la construction des micro-scénarios, puis des scénarios eux-mêmes, c'est la crédibilité même de la démarche qui est en jeu. Certes, personne n'imagine qu'un des scénarios proposés en produits de sortie de la démarche puisse se réaliser tel quel dans le futur, mais la structuration apportée par la méthode de travail offre la garantie que la réflexion a bien été menée de façon cohérente et ordonnée, que toutes les pistes ont été explorées et que les différentes hypothèses ont bien été passées au crible d'une réflexion collective et multidisciplinaire.

Quant aux déclinaisons en termes de risques et de besoins en prévention associés, elles sont aussi le fruit d'une réflexion pluridisciplinaire à laquelle sont associés les différents départements de l'institut impliqués dans les problématiques identifiées. La prospective doit aussi contribuer à cimenter la capacité de l'institut à traiter de façon globale des questions de santé et de sécurité en situation de travail : cette démarche qui pourrait sembler purement intellectuelle est aussi un moyen de se confronter à la réalité du travail aujourd'hui et d'aider à apporter des réponses concrètes à des questions précises. Dans cette logique, le recueil des contributions à l'exercice que vous avez entre les mains est le témoin et le garant de cette rigueur.

J'insisterai pour finir sur la volonté de l'INRS de mener cette opération de prospective dans un cadre de partenariats diversifiés. Notre activité se déploie jour après jour dans une logique de coopération avec tous les partenaires impliqués dans la prévention des risques professionnels : c'est dans le même cadre que nous souhaitons inscrire notre réflexion sur ce que seront les besoins demain et les réponses que nous devons y apporter.

Je suis heureux de constater que dans un contexte parfois difficile, quelles que soient les contraintes des uns et des autres, nos propositions rencontrent un écho favorable. Que nos partenaires trouvent ici l'expression de ma gratitude.

Stéphane Pimbert, directeur général de l'INRS

Méthodologie de la démarche

La démarche prospective

La prospective est un exercice qui n'a pas vocation à décrire le futur. Elle n'est pas une prévision de l'avenir qui serait une prolongation des tendances du passé dans la mesure où la prospective prend en compte les discontinuités probables. C'est un système dynamique qui explore les futurs possibles permettant ainsi d'identifier les évolutions souhaitables et qui aide à la définition d'une politique stratégique et à sa mise en œuvre. C'est un outil pour les décideurs dans la mesure où elle permet de leur fournir des éléments d'aide à la décision et ainsi d'avoir une meilleure réactivité par rapport à une situation ou un événement.

Il existe plusieurs méthodes de prospective : celle qui a été choisie pour cet exercice est dite « méthode des scénarios contrastés ». Cette méthode s'appuie sur un système de variables ou un ensemble de facteurs identifiés comme ayant une influence sur le futur du système étudié. La variation de ces facteurs va permettre de décrire des scénarios possibles.

La méthode des scénarios

Cette méthode consiste à élaborer des scénarios qui décrivent différents futurs possibles à moyen et à long terme selon l'échéance choisie. La construction de ces scénarios s'appuie sur un système de variables ou sur un ensemble de facteurs identifiés pour lequel des hypothèses d'évolution sont formulées au regard de la rétrospective et de la prospective envisagée pour chaque variable.

Sur la base des fluctuations de ces variables, des hypothèses sont décrites et la combinaison de ces hypothèses aboutit à la construction de scénarios. Ces scénarios décrivent donc des futurs possibles en s'appuyant sur un système rigoureux de variables identifiées.

Les fiches variables

Les variables clés pour le système étudié sont identifiées par des experts pluridisciplinaires dans des domaines très variés quel que soit le thème étudié (le juridique, le médical, la sociologie, la physique, la toxicologie, la chimie...). Les variables seront retenues dans la mesure où elles peuvent influencer sur l'évolution de la problématique : elles doivent rendre compte des principales inflexions et/ou rupture du domaine. Il est essentiel que le groupe d'experts soit le plus large possible en termes de disciplines afin de prendre en compte chaque facette de la problématique.

Pour chacune des variables, une fiche est établie. Cette fiche est constituée d'une synthèse historique des principales orientations prises au cours des vingt dernières années : les acteurs à l'œuvre, les ruptures intervenues,... ainsi que d'une description de la prospective de la variable décrivant ses évolutions futures.

Pour chaque fiche, découlent des hypothèses prospectives qui s'appuient sur les observations faites lors de la rétrospective et de la prospective.

Ces fiches permettent une représentation du système en dynamique, puisqu'elles prennent en compte les mécanismes mis en œuvre et la façon dont ils se poursuivent.

Les hypothèses

La rétrospective a permis d'identifier les évolutions de la variable : les tendances lourdes, les facteurs d'inflexions ou de ruptures majeures intervenus dans le passé. C'est à partir de ces différents éléments que les hypothèses sont construites. Il est important que les hypothèses formulées ne se réduisent pas aux évolutions souhaitables si on veut que soit prise en compte la totalité du champ des futurs.

De plus, ces hypothèses doivent répondre à un certain nombre d'exigences : elles doivent illustrer l'ensemble du spectre des futurs possibles ; elles doivent être contrastées ; elles doivent être incompatibles entre elles et porter uniquement sur le champ de la variable.

La construction des scénarios exploratoires

Les scénarios racontent des futurs possibles qu'ils soient souhaitables ou non. Ces scénarios décrivent une image de la situation à l'horizon envisagé. Ils sont construits à partir de la combinaison logique des hypothèses proposées pour chaque variable. Les scénarios décrits doivent être suffisamment contrastés pour offrir une vision la plus large (tout en restant dans le domaine du possible) des futurs.

Au cours de l'exercice environ trois à quatre scénarios sont retenus, ils sont choisis contrastés afin d'explorer la totalité du champ des possibles. Après, seulement, pourront être choisis les avenir souhaitables, les orientations stratégiques à donner, ainsi que leur mise en œuvre. On quitte alors le domaine de la prospective pour celui de la décision politique et/ou stratégique.

Le dispositif de travail pour cet exercice prospectif

Cet exercice a été conduit par un groupe de travail composé d'experts issus de différentes disciplines. Ce groupe a suivi une formation commune à la méthode des scénarios contrastés puis s'est réuni à plusieurs reprises pour établir les scénarios exploratoires. Chaque fiche variable a été rédigée par un ou plusieurs experts puis discutée et validée par l'ensemble du groupe de travail. De même pour les scénarios. L'exercice de prospective a été supervisé par un comité de pilotage et un groupe d'appui, en charge de la rédaction des déclinaisons en santé et sécurité au travail.

Le groupe d'experts

Le dispositif mis en place s'appuie sur un groupe de travail composé d'experts issus de différentes disciplines. Ce groupe est chargé de définir : la méthodologie et le champ de l'étude prospective (horizon temporel, territoires, activités, acteurs, etc.), d'identifier les variables, de formuler des hypothèses, puis de construire les scénarios et d'analyser leur implication. Il est constitué de quinze personnes choisies en fonction de leur expertise dans le domaine des nanomatériaux mais également pour leur spécialité.

Dans le cas de cet exercice, le groupe est composé des experts suivants :

- **Stéphane Binet**, pharmacien toxicologue, responsable du laboratoire Cancérogénèse, mutagénèse et reprotoxicité, département Toxicologie et biométrie, INRS
- **Nathalie Dedessus-Le Moustier**, juriste, spécialisée dans le droit du travail, université de Bretagne-Sud
- **Aurélien Delemarle**, spécialisée dans la construction des marchés pour les produits nouveaux, école des Ponts ParisTech
- **Stéphanie Devel**, documentaliste, mission Veille et prospective, INRS
- **Éric Draï**, sociologue, responsable d'études au laboratoire Gestion de la sécurité, département Homme au travail, INRS
- **Jean-Raymond Fontaine**, physicien, responsable du laboratoire Ingénierie aéronautique, département Ingénierie des procédés, INRS
- **François de Jouvenel**, historien, directeur de Futuribles
- **Michaël Koller**, médecin biochimiste, Suva (Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents), représentant l'AISS
- **Éric Gaffet**, chimiste, directeur de l'Institut Jean Lamour, université de Lorraine
- **Irina Guseva Canu**, médecin épidémiologiste, InVS (Institut national de veille sanitaire)
- **Cécile Ouilic-Tissier**, préventeur et chimiste, Carsat Alsace-Moselle
- **Martine Reynier**, chimiste, Direction scientifique, INRS
- **Myriam Ricaud**, chimiste, expert en prévention des risques chimiques, département Expertise et conseil technique, INRS

- **Nathalie Thieriet**, chimiste, chef de projet scientifique, Direction de l'évaluation des risques, Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail)
- **Olivier Witschger**, physicien, responsable d'étude au laboratoire Métrologie des aérosols, département Métrologie des polluants, INRS

Le groupe d'appui

Il est composé :

- des chefs des départements INRS concernés par l'exercice de prospective :
 - Agnès Aublet-Cuvelier, département Homme au travail
 - Alain Simonnard et Stéphane Binet (adjoint), département Toxicologie et biométrie
 - Benoit Courrier, département Métrologie des polluants
 - Michel Pourquet, département Ingénierie des procédés
 - Jérôme Triolet, département Expertise et conseil technique
- d'un représentant de la mission TPE/PME de l'INRS :
 - Marc Malenfer
- de la mission Veille et prospective de l'INRS :
 - Michel Héry
 - Stéphanie Devel
- du responsable de l'exercice :
 - Myriam Ricaud, département Expertise et conseil technique

Son rôle est de réfléchir aux conséquences et impacts en santé et sécurité au travail en France dans les petites entreprises des différents scénarios. Ce travail a été effectué au cours d'un séminaire de deux jours. Le résultat du travail a fait l'objet d'une discussion avec les membres du groupe d'experts.

Le comité de pilotage

Il est composé des commanditaires de l'exercice : de représentants de la direction de l'INRS, de représentants du conseil d'administration de l'INRS, de représentants de chefs de départements de l'INRS et de représentants de nos partenaires (Anses, université de Bretagne-Sud, AISS).

Son rôle est de vérifier le bon déroulé des opérations, de valider les étapes clés, notamment la définition des variables et les scénarios résultant de la réflexion des experts.

Éléments de contexte

À la découverte du nanomonde

Lors d'une conférence organisée en 1959, le physicien Richard Feynman a déclaré que les principes de la physique autorisaient la manipulation et le positionnement contrôlé des atomes et des molécules, individuellement, à la manière de briques de construction type Lego®. Par cette déclaration, le physicien américain suggérait à la communauté scientifique d'explorer l'univers de l'infiniment petit.

Le terme « nanotechnologie » fut utilisé pour la première fois en 1974. Dans les années 1980, avec la découverte du microscope à effet tunnel, puis celle du microscope à force atomique, le nanomonde s'ouvre réellement aux chercheurs.

L'unité de référence du nanomonde est le nanomètre (noté en abrégé nm). Le préfixe nano vient du grec *nanos* qui signifie nain. Un nanomètre équivaut à un milliardième de mètre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0,000000001 \text{ m}$) soit approximativement 1/50 000 de l'épaisseur d'un cheveu humain. Cette échelle est celle de l'atome, la brique élémentaire de toute matière. Il existe ainsi la même différence d'échelle entre un atome et une balle de tennis qu'entre une balle de tennis et la planète Terre.

Les nanotechnologies constituent un champ de recherche et de développement multidisciplinaire qui reposent sur la connaissance et la maîtrise de l'infiniment petit. Elles regroupent, plus précisément, l'ensemble des techniques qui permettent de fabriquer, de manipuler et de caractériser la matière à l'échelle nanométrique.

Les nanotechnologies sont la formalisation des concepts et des procédés issus des nanosciences c'est à dire des sciences qui visent à étudier et à comprendre les propriétés de la matière à l'échelle de l'atome et de la molécule.

Technologies transversales, les nanotechnologies ouvrent ainsi sur un monde où les frontières traditionnelles entre la physique, la chimie, la biologie, etc. s'estompent voire disparaissent.

Il existe de nombreuses définitions du terme « nanomatériau ».

LE SPECTRE DE LA GELÉE GRISE, L'APOCALYPSE N'AURA PAS LIEU*

Les découvertes et innovations technologiques ont de tout temps provoqué des craintes et du rejet avec leur cortège de scénarii catastrophe, voire d'apocalypse.

Avec l'avènement des nanotechnologies, un spectre a fait surface pour incarner les visions les plus sombres des peurs liées à ce développement technologique : le scénario de la gelée grise – « grey goo scenario » en anglais – faisant référence à une masse indéfinissable dans laquelle se transformerait le monde suivant le fait que des nanorobots auto-répliquants à fonctionnement autonome auraient échappé à tout contrôle, consommant toutes les ressources de la Terre pour leur continuelle autoréplication.

Ce scénario a été évoqué pour la première fois dans les années 1980 par Éric Drexler, pionnier de la nanotechnologie, pour être considéré par la suite par de nombreux penseurs et chercheurs. Robert Freitas, un des fondateurs de la nanomédecine, a créé en 2000 le terme d'écocide global pour désigner ce scénario, imaginant que ces nanorobots convertiraient l'environnement naturel (« biomasse ») en répliques d'eux-mêmes (« nanomasse »).

Ce scénario s'est répandu dans la fiction où de nombreuses variations dépeignent une fin du monde accidentelle ou causée par malveillance, et continue d'alimenter les craintes du grand public, au point que le Prince Charles a demandé à la Royal Society, académie des sciences de Grande-Bretagne, d'en analyser le risque dans son rapport sur les impacts environnementaux et sociaux des nanotechnologies.

La recherche démontre évidemment que la probabilité de tels scénarii est pour le moins infime, tout d'abord du fait que les prérequis technologiques pour réaliser de tels nanorobots relèvent du domaine de la spéculation. D'autre part, même si des machines qui s'auto-répliqueraient de manière autonome n'existent pas encore, leur théorisation préconise désormais l'inclusion de contrôles empêchant un tel scénario. Eric Drexler, son auteur initial a même essayé de se rétracter publiquement afin de recentrer le débat sur des menaces plus réalistes telles que le nanoterrorisme.

La Commission européenne a proposé en octobre 2011 (JOUE du 20 octobre 2011, L. 275/38), dans le cadre d'une recommandation¹, une définition pour le terme nanomatériau. Un nanomatériau est un matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé contenant des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat, dont au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par taille, présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm.

Est précisé dans cette recommandation, que tout matériau est à considérer comme relevant de la définition mentionnée ci-dessus, dès lors qu'il présente une surface spécifique en volume supérieure à 60 m²/cm³.

Il est également mentionné dans ce texte, que dans des cas spécifiques, lorsque cela se justifie pour des raisons tenant à la protection de l'environnement, à la santé publique, à la sécurité ou à la compétitivité, le seuil de 50 % fixé pour la répartition numérique par taille peut être remplacé par un seuil compris entre 1 % et 50 %.

D'autres instances et organismes ont proposé des définitions du terme « nanomatériau » tels que l'Organisation internationale de normalisation.

Les nanomatériaux produits de façon intentionnelle par l'homme à des fins d'applications précises et possédant des propriétés spécifiques sont nommés « nanomatériaux manufacturés ». Parmi ces nanomatériaux manufacturés, certains sont produits depuis déjà de nombreuses années dans des tonnages importants tels que le dioxyde de titane, le noir de carbone, l'alumine, le carbonate de calcium ou la silice amorphe. D'autres plus récents sont fabriqués dans des quantités moindres tels que les nanotubes de carbone, les quantum dots ou les dendrimères.

Il existe également des nanomatériaux produits par l'homme de façon non intentionnelle, appelés parfois particules ultra-fines, issus de certains procédés thermiques et mécaniques tels que les fumées de soudage ou de projection thermique, les émissions de moteurs à combustion, etc.

Enfin, des particules ultra-fines naturelles sont présentes dans notre environnement, à l'image des fumées volcaniques ou des virus.

¹ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:FR:PDF>

* Article écrit par Jan Irmer, journaliste.

Des enjeux économiques considérables

Le passage de la matière à des dimensions nanométriques fait apparaître des propriétés inattendues et souvent totalement différentes de celles des mêmes matériaux à l'échelle micro ou macroscopique, en termes par exemple de résistance mécanique, de réactivité chimique, de conductivité électrique ou de fluorescence. Les nanotechnologies conduisent donc à l'élaboration de matériaux dont les propriétés fondamentales (chimiques, mécaniques, optiques, biologiques, etc.) peuvent être modifiées. Par exemple, l'or est totalement inactif à l'échelle micrométrique alors qu'il devient un excellent catalyseur de réactions chimiques lorsqu'il prend des dimensions nanométriques.

Toutes les grandes familles de matériaux sont concernées : les métaux, les céramiques, les diélectriques, les oxydes magnétiques, les polymères, les carbones, etc.

Du fait de leurs propriétés variées et souvent inédites, les nanomatériaux recèlent de potentialités très diverses et leurs utilisations ouvrent de multiples perspectives.

Ils permettent ainsi des innovations incrémentales et de rupture dans de nombreux secteurs d'activité tels que la santé, le transport, la construction, la cosmétique, l'énergie, l'environnement, l'agroalimentaire, la chimie, la plasturgie, l'emballage, le textile, la défense ou encore l'électronique : vectorisation de médicaments, bétons auto-nettoyants, vêtements anti-bactériens, peintures anti-rayures, etc.

Les nanomatériaux recèlent ainsi un potentiel de développement économique et d'emplois considérable. Des budgets colossaux sont dédiés à la recherche et au développement à travers le monde. De plus en plus de laboratoires privés comme publics sont ainsi concernés par le déploiement croissant de ces technologies de l'infiniment petit. De même, les entreprises fabriquant ou utilisant des nanomatériaux sont chaque jour plus nombreuses.

La Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services (DGCI) du ministère du Redressement productif a publié en 2012 une étude intitulée *Les réalités industrielles dans le domaine des nanomatériaux en France*. Cette étude présente la chaîne de valeur depuis la production de nanomatériaux jusqu'aux différents marchés d'application. Elle montre que 80 % des producteurs français de nanomatériaux sont des TPE/PME. La production annuelle de nanomatériaux atteindrait un total de 135 000 tonnes. Il convient de noter que ce récent bilan de la production annuelle au niveau national diffère sensiblement de celui issu de l'enquête publiée par l'INRS en 2007² et de celle menée par l'AFSSET³ en 2008.

Le dispositif de déclaration annuelle des « substances à l'état nanoparticulaire » entré en vigueur en France depuis le 1^{er} janvier 2013, conformément aux articles L. 523-1 à L. 523-8 du Code de l'environnement, devrait permettre de mieux connaître les nanomatériaux et leurs usages. Cette déclaration concerne les fabricants, les importateurs et les distributeurs de telles substances mises sur le marché en France, et est obligatoire au-delà de 100 grammes par an et par substance. Un premier rapport public concernant cette déclaration a été publié fin 2013 sur le site du ministère du Développement durable, *Éléments issus des déclarations des substances à l'état nanoparticulaire*. Selon ce rapport, 670 entités françaises ont soumis au moins une déclaration (22 % sont des importateurs, 6 % sont des producteurs, 68 % sont des distributeurs et 4 % sont des acteurs « autres »). 280 000 tonnes de substances à l'état

² Production et utilisation industrielle des particules nanostructurées, ND 2277, INRS, Paris, 2007.

³ Les nanomatériaux. Sécurité au travail, AFSSET, 2008.

nanoparticulaire produites et 220 000 tonnes de substances à l'état nanoparticulaire importées en France en 2012 ont été déclarées, soit un total de 500 000 tonnes de « substances à l'état nanoparticulaire » mises sur le marché en France en 2012.

Au vu de ces études, nombre de salariés sont donc d'ores et déjà potentiellement exposés aux nanomatériaux manufacturés que ce soit dans les laboratoires de recherche, les usines de fabrication ou les sites d'utilisation.

D'après certaines estimations, les nanotechnologies emploieraient aujourd'hui entre 300 000 à 400 000 personnes en Europe. En France, 5 000 salariés en entreprise et 7 000 chercheurs seraient potentiellement exposés aux nanomatériaux manufacturés.

Une priorité pour la prévention

D'un côté, chacun peut déceler dans le développement des nanotechnologies et des nanomatériaux le moteur d'une croissance économique et d'un progrès dont nous n'entrevoions probablement que les balbutiements.

Mais de l'autre, ils suscitent des craintes et portent à s'interroger. Des inquiétudes s'expriment notamment en termes de dangers pour la santé. Des questions éthiques, juridiques et sociétales se posent également.

Si toutes les grandes avancées scientifiques et techniques sont porteuses de conséquences ambivalentes, les nanotechnologies et nanomatériaux ne font pas exception à la règle.

Les connaissances sur la toxicité (et l'écotoxicité) des nanomatériaux manufacturés demeurent parcellaires, même si les études publiées sur le sujet sont nombreuses. Les résultats sont souvent de portée limitée : études *in vitro* réalisées sur des modèles cellulaires difficilement extrapolables à l'homme ; études *in vivo* chez l'animal effectuées via des voies d'exposition non représentatives, sur de courtes périodes et avec des nanomatériaux insuffisamment caractérisés du point de vue physico-chimique.

De même, les données relatives aux expositions professionnelles aux nanomatériaux manufacturés restent limitées. Sont notamment incriminés le manque de consensus quant aux critères de mesure, un cortège d'instruments en majorité inappropriés et des stratégies de mesure non stabilisées.

Dans ce contexte, rechercher puis proposer des moyens de prévention efficaces vis-à-vis des nanomatériaux manufacturés s'avère indispensable mais délicat. D'abord parce qu'il n'existe pas de valeur seuil à atteindre pour s'assurer d'une protection adéquate, mais également en raison des niveaux de protection élevés qui pourraient être requis pour les nanomatériaux présentant un risque sanitaire avéré. Il est toutefois primordial de contrôler la performance des équipements utilisés en s'appuyant sur l'état de l'art et sur les connaissances aujourd'hui disponibles. Comme pour tous les polluants particuliers, les moyens de prévention reposent principalement sur les techniques de ventilation et d'épuration de l'air.

Anticiper et maîtriser les risques associés aux nanomatériaux manufacturés figurent parmi les priorités de la plupart des organismes de santé et sécurité au travail dans le monde. L'INRS se mobilise depuis plusieurs années déjà pour apporter des réponses et les mettre à la disposition de tous ceux qui, en entreprise ou en laboratoire, sont en

charge de la prévention des risques. Dans un premier ouvrage de synthèse publié en 2007 par l'INRS⁴, il ressortait d'immenses besoins en termes de recherche en toxicologie, en métrologie, etc. et l'urgence de développer et de préconiser des mesures de prévention adaptées.

⁴ Les nanoparticules. Un enjeu majeur pour la santé au travail ?, Avis d'experts, EDP Sciences, 2007.

La nature et les propriétés des nanomatériaux

Nathalie Thieriet, Anses, et Éric Gaffet, Institut Jean Lamour

Définition

Cette fiche traite de la conception, de la production et de la mise sur le marché de nouvelles générations de nanomatériaux manufacturés aux propriétés inédites (répondant ou non à une demande, à un besoin).

La définition du terme nanomatériau pose, en elle-même, de nombreuses questions et suscite des controverses. Les définitions proposées font encore l'objet de nombreuses discussions scientifiques, réglementaires, institutionnelles ainsi qu'au sein de la société civile et ne sont pas totalement satisfaisantes en l'état.

Aucune définition actuelle ne prend en compte certains paramètres importants comme la solubilisation (amener une substance à l'état de solution ou de suspension colloïdale) ou la taille moyenne des agglomérats et agrégats. La connaissance de ces paramètres participe pourtant à la compréhension des mécanismes d'action sur le vivant des nanomatériaux manufacturés.

Rétrospective

L'unité de référence du nanomonde est le nanomètre (noté en abrégé nm). Le préfixe nano vient du grec nannos qui signifie nain. Un nanomètre équivaut à un milliardième de mètre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0,000\,000\,001 \text{ m}$) soit approximativement 1/50 000 de l'épaisseur d'un cheveu humain (figure 1). Cette échelle est celle de l'atome, la brique élémentaire de toute matière. Il existe ainsi la même différence de taille entre un atome et une balle de tennis qu'entre une balle de tennis et la planète Terre.

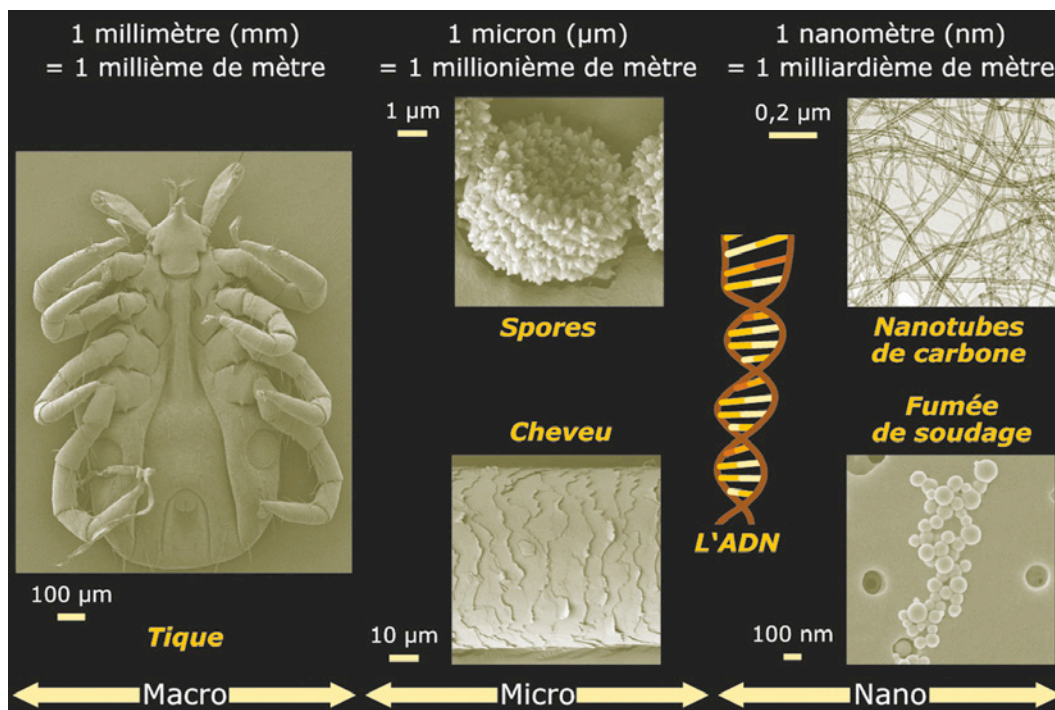


Figure 1. L'échelle des dimensions, du visible à l'invisible.

Source : INRS, ED 6050

Il existe de nombreuses définitions du terme nanomatériau.

La Commission européenne a proposé en octobre 2011, dans le cadre d'une recommandation, une définition pour le terme nanomatériau¹. Un nanomatériau est un matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé, contenant des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat, dont au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par taille, présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm.

Tout matériau est également à considérer comme relevant de la définition mentionnée ci-dessus dès lors qu'il présente une surface spécifique en volume à $60 \text{ m}^2/\text{cm}^3$.

Il est précisé dans cette recommandation que, dans des cas spécifiques, lorsque cela se justifie pour des raisons tenant à la protection de l'environnement, à la santé publique, à la sécurité ou à la compétitivité, le seuil de 50 % fixé pour la répartition numérique par taille peut être remplacé par un seuil compris entre 1 % et 50 %.

Il est également indiqué que, par dérogation, les fullerènes, les flocons de graphène et les nanotubes de carbone à paroi simple présentant une ou plusieurs dimensions externes inférieures à 1 nm sont à considérer comme des nanomatériaux.

Selon la norme ISO TS 80004-1, un nanomatériau est un matériau dont au moins une dimension externe est à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire comprise approximativement entre 1 et 100 nm, ou qui possède une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique.

¹ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ.do?cri=OJ:L:2011:275:0038:0040:FR:PDF>

Il existe deux grandes familles de nanomatériaux (figure 2) :

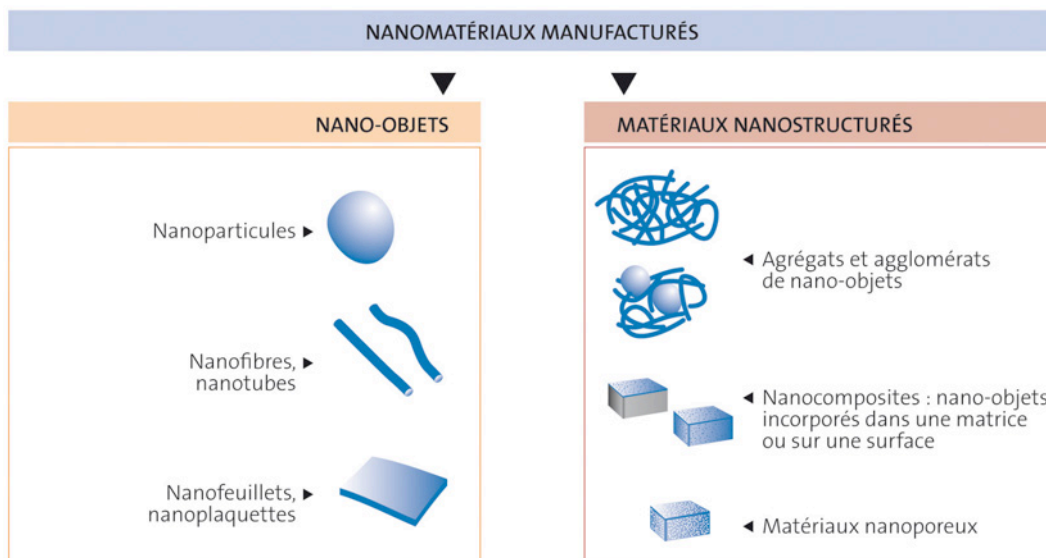


Figure 2. La classification des nanomatériaux selon la norme ISO TS 80004-1.

Source : INRS, ED 6115

1. Les nano-objets sont des matériaux dont une, deux ou trois dimensions externes se situent à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire approximativement entre 1 et 100 nm.

Parmi les nano-objets, il est possible de distinguer trois catégories :

- *les nanoparticules*, qui désignent des nano-objets dont les trois dimensions externes se situent à l'échelle nanométrique : nanoparticules de latex, d'oxyde de zinc, de fer et de cérium, d'alumine, de dioxyde de titane, de carbonate de calcium, etc. ;
- *les nanofibres, nanotubes, nanofilaments ou nanobâtonnets*, qui se rapportent à des nano-objets dont deux dimensions externes sont à l'échelle nanométrique et la troisième dimension significativement supérieure (nanotubes de carbone, nanofibres de polyester, nanotubes de bore, etc.). Ces termes désignent des nano-objets longilignes de section comprise entre 1 et quelques dizaines de nm et de longueur comprise entre 500 et 10 000 nm ;
- *les nanofeuillets, nanoplats ou nanoplaquettes*, qui définissent des nano-objets dont une dimension externe se situe à l'échelle nanométrique et les deux autres dimensions sont significativement supérieures (nanofeuillets d'argile, nanoplaquettes de sélénure de cadmium, etc.).

Les nano-objets peuvent être utilisés en tant que tels sous forme de poudre, de suspension liquide ou de gel.

2. Les matériaux nanostructurés sont des matériaux qui possèdent une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique. Parmi les matériaux nanostructurés, il est possible de distinguer plusieurs familles, parmi lesquelles :

- *les agrégats et agglomérats de nano-objets* : les nano-objets peuvent se présenter soit sous forme individuelle (c'est-à-dire sous forme de particules primaires), soit sous forme d'agrégats ou d'agglomérats dont la taille est sensiblement supérieure à 100 nm ;

- *les nanocomposites* : ces matériaux sont composés pour tout ou partie de nano-objets qui leur confèrent des propriétés améliorées ou spécifiques de la dimension nanométrique. Les nano-objets sont incorporés dans une matrice ou sur une surface afin d'apporter une nouvelle fonctionnalité ou de modifier certaines propriétés mécaniques, magnétiques, thermiques, etc. Les polymères chargés de nanotubes de carbone utilisés dans le secteur des équipements sportifs, afin d'améliorer leur résistance mécanique et de diminuer leur poids, constituent un exemple de nanocomposites ;
- *les matériaux nanoporeux* : ces matériaux possèdent des pores de taille nanométrique. Les aérogels de silice sont des matériaux nanoporeux qui présentent d'excellentes propriétés d'isolation thermique.

Applications

Le passage de la matière à des dimensions nanométriques fait apparaître des propriétés inattendues et souvent totalement différentes de celles des mêmes matériaux à l'échelle micro- ou macroscopique, notamment en termes de résistance mécanique, de réactivité chimique, de conductivité électrique et de fluorescence. Les nanotechnologies conduisent donc à l'élaboration de matériaux dont les propriétés fondamentales (chimiques, mécaniques, optiques, biologiques, etc.) peuvent être modifiées. Par exemple, l'or est totalement inactif à l'échelle micrométrique alors qu'il devient un excellent catalyseur de réactions chimiques lorsqu'il prend des dimensions nanométriques.

Toutes les grandes familles de matériaux sont concernées : les métaux, les céramiques, les diélectriques, les oxydes magnétiques, les polymères, les carbonés, etc.

Du fait de leurs propriétés variées et souvent inédites, les nanomatériaux recèlent des potentialités très diverses et leurs utilisations ouvrent de multiples perspectives.

Les nanomatériaux permettent ainsi des innovations incrémentales et de rupture dans de nombreux secteurs d'activité tels que la santé, l'automobile, la construction, l'agroalimentaire ou encore l'électronique.

Fabrication

Les nanomatériaux manufacturés peuvent être synthétisés selon deux approches différentes (figure 3). Il convient ainsi de différencier la méthode dite ascendante (en anglais *bottom-up*) de la méthode dite descendante (en anglais *top-down*).

- L'approche ascendante vient des laboratoires de recherche et des nanosciences. Elle consiste à construire les nanomatériaux atome par atome, molécule par molécule ou agrégat par agrégat. L'assemblage ou le positionnement des atomes, des molécules ou des agrégats s'effectue de façon précise, contrôlée et exponentielle permettant ainsi l'élaboration de matériaux fonctionnels dont la structure est complètement maîtrisée.
- L'approche descendante est issue de la microélectronique. Elle consiste à réduire et plus précisément à miniaturiser les systèmes actuels (généralement des matériaux microstructurés) en optimisant les technologies industrielles existantes. Les dispositifs ou les structures sont ainsi graduellement sous-dimensionnés ou fractionnés jusqu'à atteindre des dimensions nanométriques.

Les deux approches tendent à converger en termes de gamme de tailles des objets. L'approche *bottom-up* semble, néanmoins, plus riche en termes de type de matière, de diversité d'architecture et de contrôle de l'état nanométrique alors que l'approche

top-down permet d'obtenir des quantités de matière plus importantes mais le contrôle de l'état nanométrique s'avère plus délicat.

L'approche ascendante fait appel à des procédés d'élaboration chimiques et physiques (réactions en phase vapeur, techniques sol-gel, pyrolyse laser, micro-ondes, etc.) alors que l'approche descendante induit, principalement, l'utilisation de méthodes mécaniques (mécano-synthèse, forte déformation par torsion, etc.).

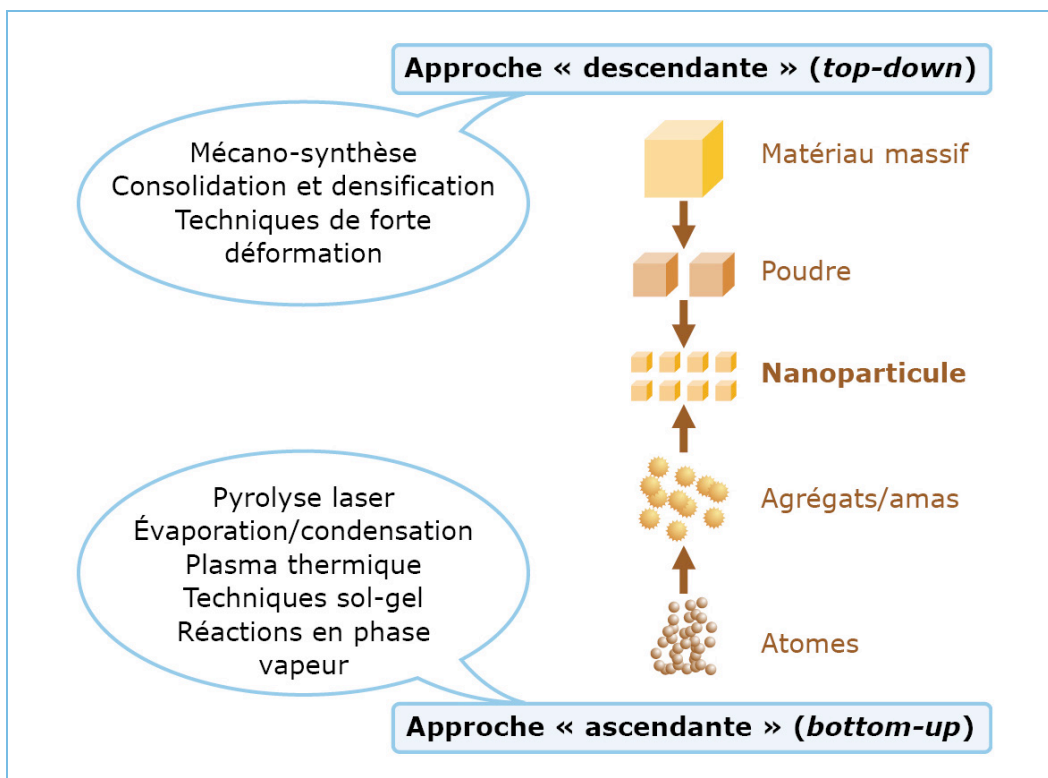


Figure 3. Les deux approches d'élaboration des nanomatériaux manufacturés.

Source : INRS, ED 6050

Prospective

Selon l'analyse développée dès 2004 par M. C. Rocco², le développement des nanotechnologies / nanomatériaux concerne quatre étapes de production : les nanostructures passives, les nanostructures actives, les systèmes de nanosystèmes et enfin les nanosystèmes moléculaires. La figure 4 illustre cette analyse. Les nanoproducts actuellement commercialisés appartiennent essentiellement à la catégorie des nanostructures passives et quelques nanostructures actives sont en cours de développement.

² Rocco M.C., 2004. Nanoscale science and engineering : unifying and transforming tools, AIChE Journal 50 (5), 890-897.

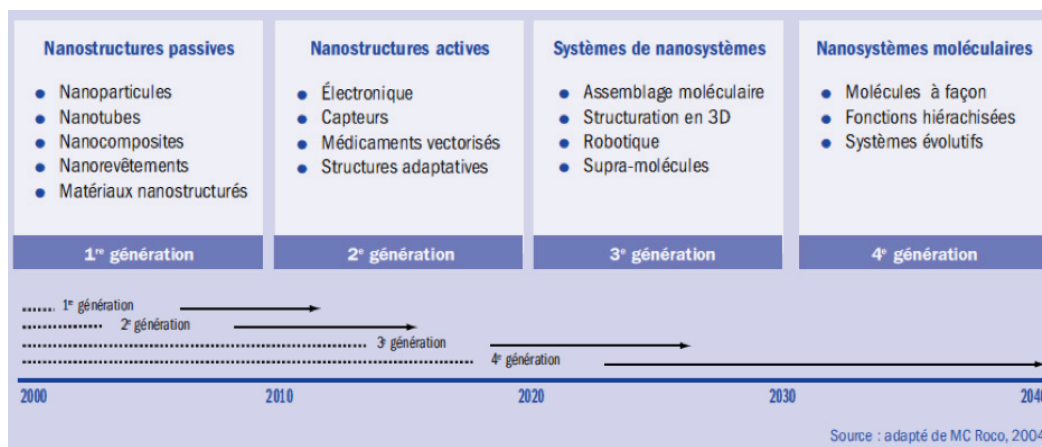


Figure 4. Développement des nanotechnologies.

Les quatre générations de nanostructures / nanosystèmes.

Source : Gaffet Éric, Nanomatériaux : différentes voies de synthèse, propriétés, applications et marchés, Actualité et dossier en santé publique n° 64, septembre 2008, Haut conseil de la santé publique, Paris.

Une nanostructure active est une structure susceptible de modifier son état (morphologie, forme, propriétés mécaniques, électroniques, magnétiques, optiques, biologiques, etc.) pendant son utilisation. On peut citer la mise en œuvre de nanostructures (souvent des nanoparticules) susceptible de se dissoudre dans le temps ou bien ayant une composition chimique pour franchir des barrières biologiques afin de « véhiculer » des principes actifs dans le domaine de la médecine. Des exemples de telles nanostructures actives sont les systèmes nano-électro-mécaniques (NEMS), les nano-dispositifs biologiques, les transistors, les amplificateurs, les vecteurs pharmaceutiques et chimiques, les machines moléculaires, les moteurs moléculaires activés par la lumière, les dispositifs mettant en œuvre la nanofluidique, les capteurs ou encore les dispositifs radiofréquences (RFID).

Hypothèses

Hypothèse 1. Développement tendanciel des nanomatériaux

Le développement des technologies et des connaissances permet d’atteindre la production de nanomatériaux de 4^{ème} génération.

Cette hypothèse suppose un faible coût de fabrication, peu de risques et une grande utilité.

Hypothèse 2. Développement modéré ou ralenti des nanomatériaux

Le développement des technologies et des connaissances ne permet pas d’atteindre la production de nanomatériaux jusqu’à la 4^{ème} génération, on reste entre la 2^{ème} et la 3^{ème} génération.

Cette hypothèse suppose soit :

- un fort coût de fabrication, peu de risques et une grande utilité,
- un faible coût de fabrication, des risques possibles et une grande utilité,
- un faible coût de fabrication, des risques possibles et une faible utilité.

Hypothèse 3. Arrêt du développement des nanomatériaux

Le développement des technologies et des connaissances ne permet pas d'atteindre la production de nanomatériaux de 3^{ème} génération.

Cette hypothèse suppose un fort coût, des risques possibles et une faible utilité.

Les technologies et les procédés

Olivier Witschger, INRS

Définition

Cette fiche variable traite des technologies et des procédés permettant de synthétiser et de caractériser les nanomatériaux manufacturés.

Rétrospective

Les nanomatériaux sont l'un des vecteurs du développement des nanosciences. S'ils représentent aujourd'hui un des axes de développement technologique les plus innovants, c'est parce qu'en France et dans le reste du monde, depuis plus de vingt ans, de nombreux acteurs (organismes de recherche, entreprises) ont investi, se sont associés et ont participé à de multiples projets de recherche et développement pour définir, évaluer, fiabiliser et industrialiser des technologies et procédés permettant de synthétiser des nanomatériaux. Comme l'illustre la figure 1, les technologies et procédés sont classés généralement suivant deux approches qui coexistent : l'une est dite descendante (*top-down*) et l'autre est dite ascendante (*bottom-up*).

L'approche ascendante consiste à élaborer à partir d'unités fondamentales (atomes, molécules, agrégats) des structures ou des assemblages de plus grande taille riches en fonctionnalités, l'élaboration s'appuyant sur des procédés physiques, chimiques ou mécaniques. Il en existe de nombreux ; on trouve par exemple les technologies d'évaporation-condensation afin d'obtenir des poudres nanostructurées, les technologies de pulvérisation cathodique pour faire croître des couches minces continues ou de grains à la surface de substrats, les technologies sol-gel qui permettent de produire des nanomatériaux à partir de solutions, etc.

L'approche descendante consiste quant à elle à miniaturiser les structures ou matériaux existants. L'industrie de la microélectronique a mis en œuvre depuis plus de trente ans cette approche pour intégrer un maximum de composants élémentaires (transistors, filtres etc.) dans une surface donnée. C'est ainsi que les technologies de lithographies (optiques, rayons X, électroniques), ou de gravures par faisceaux d'ions qui permettent de réaliser un

empilement de couches minces de divers matériaux adaptés (semi-conducteurs, métalliques, isolants) ont été développées. Dans l'approche descendante, il existe également une voie mécanique pour l'élaboration de nanomatériaux. Elle fait appel à des technologies issues de la métallurgie des poudres, comme par exemple la mécanosynthèse (ou broyage à haute énergie) pour élaborer des poudres nanostructurées, ou bien la consolidation pour obtenir des pièces massives à partir de poudres (métalliques, céramiques, semi-conductrices et organiques).

Si, depuis près de vingt ans, les deux approches tendent à converger en termes de taille des objets primaires obtenus, l'approche ascendante semble plus riche en termes de type de matière, de diversité des structures et de contrôle de l'état nanométrique (taille, dispersion de taille, phases etc.). L'approche descendante permet quant à elle d'obtenir aujourd'hui des volumes de nanomatériaux plus importants, mais donc le contrôle de l'état nanométrique est plus délicat. Un grand nombre de ces procédés sont encore en phase d'évolution et leur utilisation se limite bien souvent au milieu de la recherche et du développement.

La contribution française aux technologies et procédés montre une activité importante dans le domaine de la recherche académique (depuis le début des années 1990, la France fait partie des cinq pays majeurs en termes de contribution), mais une position faible dans le dépôt des brevets (moins de 5 % des brevets déposés au niveau mondial).

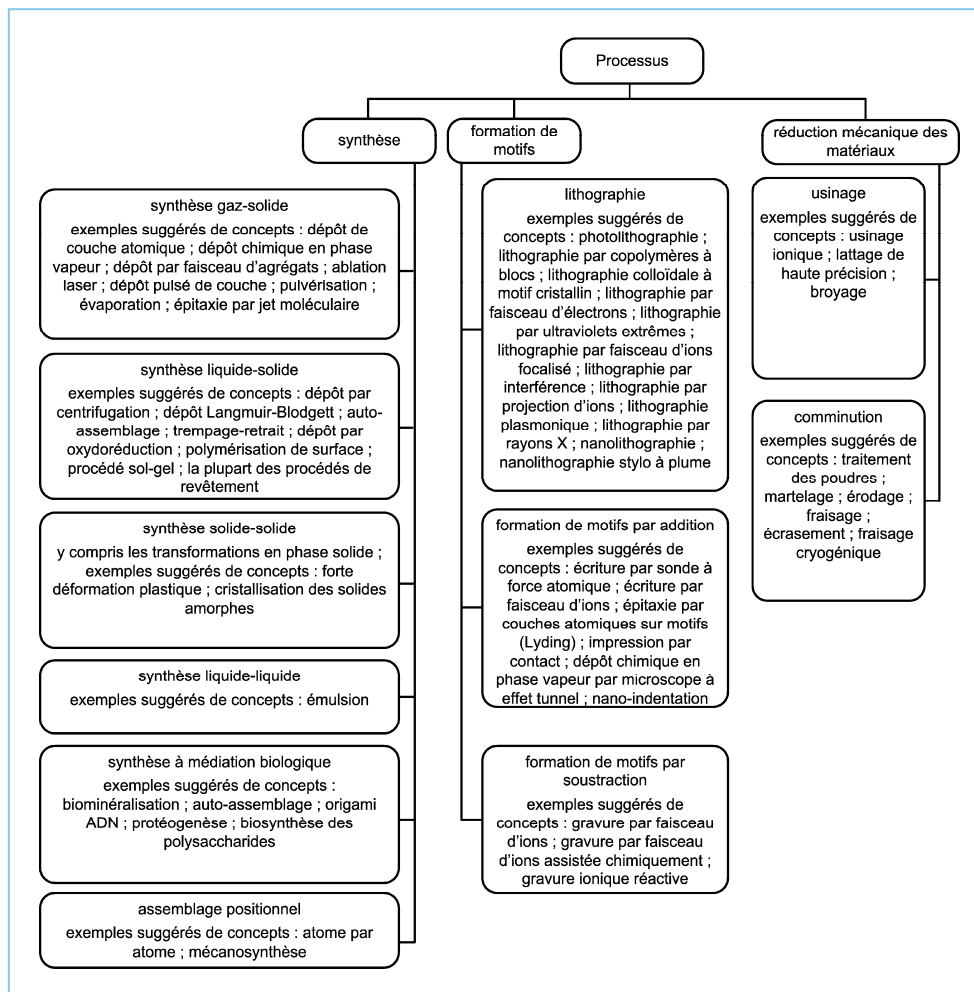


Figure 1. Les différents technologies et procédés pour la synthèse de nanomatériaux
Source : ISO / TR 12802 : 2010.

Les progrès des technologies et procédés de synthèse n'ont pu se faire que parce qu'ils étaient accompagnés par des avancées significatives dans les techniques de caractérisation physico-chimique (taille, forme, polydispersité, composition chimique, état d'agrégation / agglomération, charge en surface, surface spécifique, structure cristalline, solubilité etc.). Il reste néanmoins à établir les différentes chaînes de traçabilité, à définir des protocoles de mesure et des méthodes d'échantillonnage afin d'être capable d'associer à chaque mesure un niveau de confiance optimal.

Prospective

L'état des connaissances actuelles, les voies de recherche explorées et les technologies et procédés développés, pour certains déjà matures, laissent espérer pour les décennies à venir des découvertes et de nombreuses innovations technologiques. La fabrication de nanomatériaux au niveau industriel, c'est-à-dire dans des volumes importants, avec une bonne qualité, une bonne reproductibilité, et enfin à un coût acceptable reste pour les années à venir un enjeu majeur.

En effet, il convient de souligner que l'industrialisation des technologies et procédés se fera inévitablement à la croisée de disciplines qui ne sont généralement pas naturellement associées (chimie, physique, biologie, ingénierie des procédés). Ainsi, un des facteurs clés de succès du développement passe par la mise en œuvre d'approches véritablement multidisciplinaires qui vont nécessiter de plus en plus de recherche, de plateformes technologiques et de profils capables de faire le lien et d'assurer une synergie entre les différents domaines. En France, le développement entre conceptualisation et industrialisation au sein des PME et TPE dépendra en partie de la prise en compte de ces éléments au travers, par exemple, de formations spécifiques (à l'instar du *Nanotechnology Education Act* aux États-Unis), et de soutiens à des projets d'innovations industrielles prenant en compte toute la chaîne de valeur (collaboration entre entreprises, universités et organismes de R&D extra-universitaires).

Hypothèses

Les hypothèses sont construites sur le fait que le chemin qui mène des propriétés fondamentales aux applications est rarement direct ; il est généralement semé de verrous. Ceux-ci peuvent bloquer les passages obligés de la conceptualisation à l'industrialisation en passant par l'indispensable validation en laboratoire.

Hypothèse I. Verrous entre conceptualisation et laboratoire

Faute d'un accroissement des recherches, les développements sont bloqués sur certains verrous. Seule l'optimisation de procédés classiques de production a abouti à des innovations.

Hypothèse 2. Verrous entre laboratoire et industrialisation

L'accroissement des recherches pour les technologies et procédés à fort potentiel a conduit à des démonstrations de faisabilité à l'échelle pilote industriel. Un réseau de PME/TPE qui maîtrise ces technologies et procédés innovants pour de nombreuses applications a commencé à se structurer. Néanmoins, le stade de l'industrialisation n'est souvent pas atteint.

Hypothèse 3. Plus de verrous

De nombreux verrous ont été levés et l'industrialisation a été rendue possible grâce aux recherches. Des technologies et procédés innovants ont été développés ; ils répondent aux besoins de marchés tels que l'aéronautique, l'espace, la défense, les transports, l'électronique.

Références

- ISO/TR 12802 : 2010, Nanotechnologies - Modèle de cadre taxinomique pour l'utilisation dans le développement de vocabulaires - Concepts de base.
- ISO/TS 80004-8 : 2013, Nanotechnologies - Vocabulaire - Partie 8: Processus de nanofabrication.
- Les nanotechnologies. Réalités industrielles, novembre 2003.
- Les nanotechnologies. Le magazine des Ingénieurs de l'Armement, CAIA n°84, septembre 2007.
- Les Nanosciences. Volume I. Nanotechnologies et nanophysique. 3^{ème} édition revue et augmentée. Belin, 2009.
- Nanomatériaux. Structure et élaboration. Techniques de l'ingénieur, NM3010 : 2001.

Les investissements publics et privés

Aurélie Delemarle, École des Ponts ParisTech

Définition

Il n'existe pas d'indicateur largement partagé pour quantifier les investissements dans les nanosciences et les nanotechnologies. Les données, identifiées dans les différents rapports, ne sont que difficilement comparables car basées sur des méthodologies différentes et peu explicites.

Plusieurs éléments expliquent ce manque de données comparables :

- le premier élément justifiant de cette situation est que les investissements visibles (et mesurables) ne sont que relativement récents (depuis les années 2000 environ) ;
- le deuxième élément concerne la difficulté à se saisir de l'objet « nanosciences et nanotechnologies ». En effet, il n'existe pas de définition partagée sur les nanosciences et les nanotechnologies. On note des efforts de l'OCDE, de l'ISO ou de l'Union européenne pour développer des statistiques et des indicateurs communs (projets européens FP7 *Observatory Nano*, *NMPscoreboard*, *NanoIndicators*) mais aucune méthodologie n'est partagée. Le préfixe nano n'est qu'un indicateur de taille : il existe depuis longtemps des secteurs travaillant à ces échelles. Il convient donc de prendre en compte la notion de *relabelling*, c'est-à-dire des « renommages » de projets scientifiques ou technologiques pour profiter des financements et des opportunités offerts par l'engouement autour des nanosciences et des nanotechnologies ;
- le troisième élément, lié aux précédents, concerne le caractère transverse des nanosciences et des nanotechnologies. On les appelle génériques ou *general purpose technologies* (Bresnahan et Trajtenberg, 1995) ;
- enfin, le dernier élément est lié au fait qu'il est difficile de comparer, au-delà des quelques indicateurs disponibles, les financements publics nationaux car :
 - selon les pays, les programmes incorporant des financements nanosciences et nanotechnologies peuvent être spécifiques (NNI aux États-Unis) ou génériques (FP 7 en Europe *Nanosciences, technologies, materials and new production technologies*) ;

- il existe une plus ou moins grande fragmentation dans l'organisation des financements. En Allemagne et aux États-Unis, une agence nationale ou une stratégie multi-agence structure et harmonise les investissements. En France et au Royaume-Uni, plusieurs agences disposent de financements non coordonnés ;
- il existe des programmes de niveaux très différents : la focale peut être mise sur de grands défis sociétaux (Royaume-Uni et Japon) ou sur des technologies.

Indicateurs

1. Indicateurs d'input / d'entrée :

- investissements publics (programmes spécifiques ou génériques),
- investissements privés (financement des entreprises).

2. Indicateurs d'output / de sortie :

- nombre de publications scientifiques (proxy pour l'investissement dans la recherche fondamentale),
- nombre de brevets déposés (proxy pour l'investissement dans la recherche appliquée),
- nombre d'entreprises : cet indicateur n'est pas retenu car trop difficile à définir parce qu'il existe différents degrés d'utilisation et de maîtrise des nanotechnologies.

Rétrospective

Investissements publics : des programmes importants dans tous les pays, au delà de la triade

Le tableau I et la figure I reprennent les principaux programmes nationaux de financement publics des nanotechnologies. Suivant l'exemple des États-Unis, presque tous les grands pays ont développé un programme public de financement des nanotechnologies. Les États-Unis restent néanmoins les plus importants financeurs.

Pays	Programmes de financement	Nano-spécifique	Période	Montant sur la période => valeur annuelle moyenne
Brésil	Ministry for Science & Technology	non	estimation annuelle	€ 4.9 millions
Chine	Medium & Long Term Development Plan	oui	2006 - 2008	€ 29.1 millions
Union Européenne	Framework Programme 7	non	2007 - 2013	€ 3.5 billions
France	Nano 2012 Programme	oui	2008 - 2012	€ 500 millions
Allemagne	Nano Initiative - Action Plan 2010	oui	2008 - 2013	€ 370 millions
Inde	Nano Mission	oui	2007 - 2012	€ 144.8 millions
Japon	MEXT	non	estimation annuelle	€ 470 millions
Russie	Development of nanotechnology infrastructure in the Russian Federation for 2008 - 2011	oui	2008 - 2011	€ 693.3 millions
Royaume-Uni	Research Councils UK / Technology Strategy Board	non	estimation annuelle	€ 256 millions
États-Unis	National Nanotechnology Initiative	oui	2012	€ 1.6 billions

Tableau 1. Les programmes nationaux principaux de financement public des nanotechnologies (équivalent en euros).

Source : O'Rourke, Morrison DSTI/STP/Nano, 2012

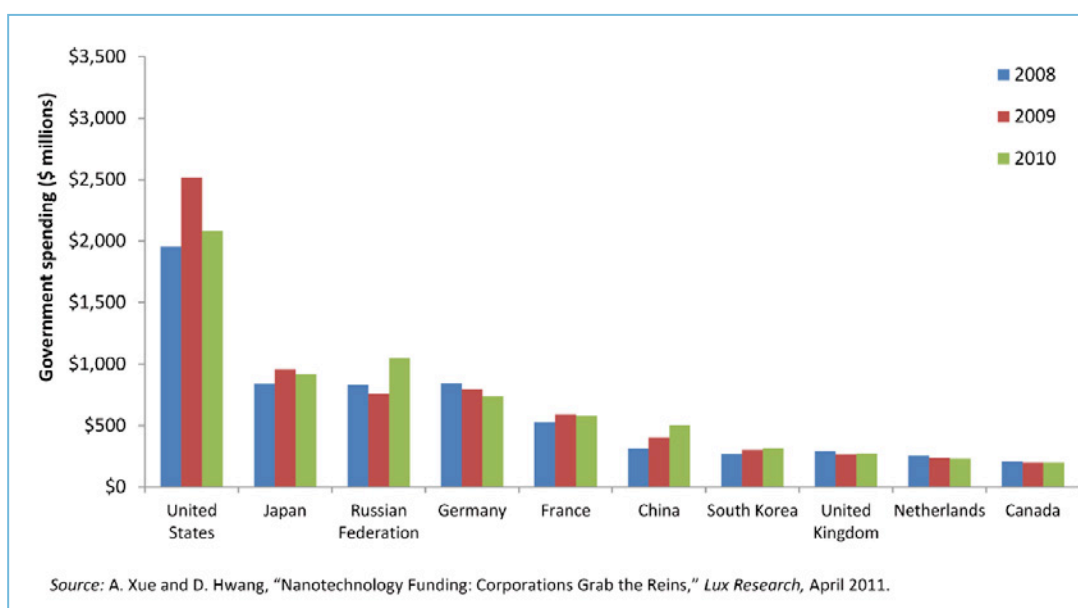


Figure 1. 10 plus grands financements publics en nanotechnologies (2008-2010) en dollars.

Source : Reproduit de PCAST, 2012

Investissements privés : des situations très contrastées

La représentation des investissements privés (figure 2) montre bien que les entreprises des grands pays sont également présentes sur le champ des nanotechnologies. La France garde la même position (5^{ème}). Néanmoins, la Russie sort du classement des 10 plus grands investisseurs tandis que de plus petits pays comme la Suisse, la Suède ou Israël entrent dans la liste.

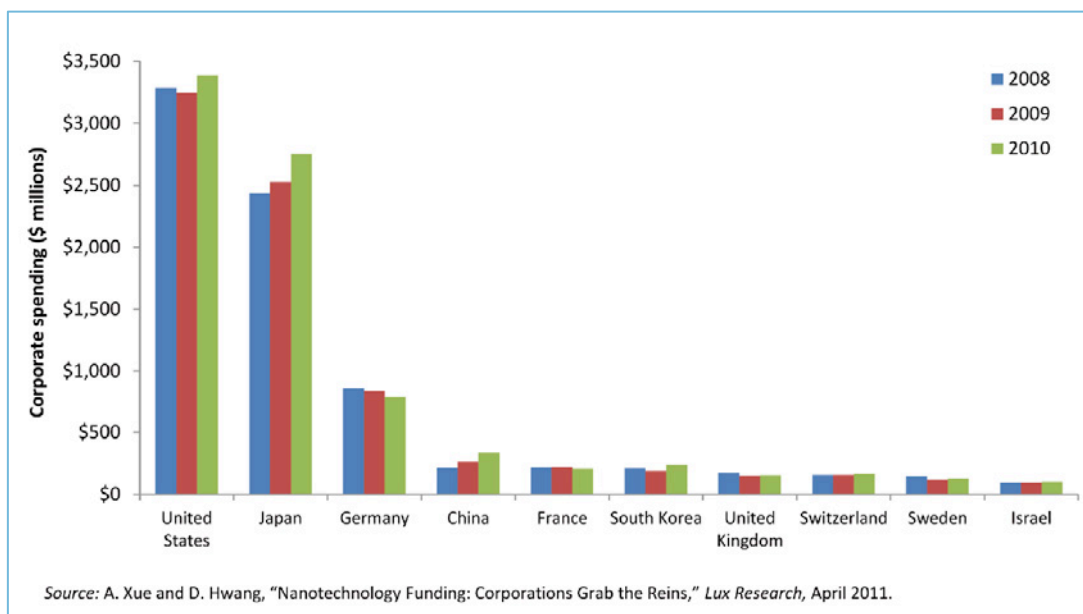


Figure 2. Les dépenses privées de R&D pour les 10 plus grands pays (2008-2010).

Source : Reproduit de PCAST, 2012

La figure 3, illustrant le financement par le capital-risque, montre quant à elle une image très contrastée entre les États-Unis et le reste du monde. Ce pays est le seul à disposer d'une structure soutenant les financements de projets risqués.

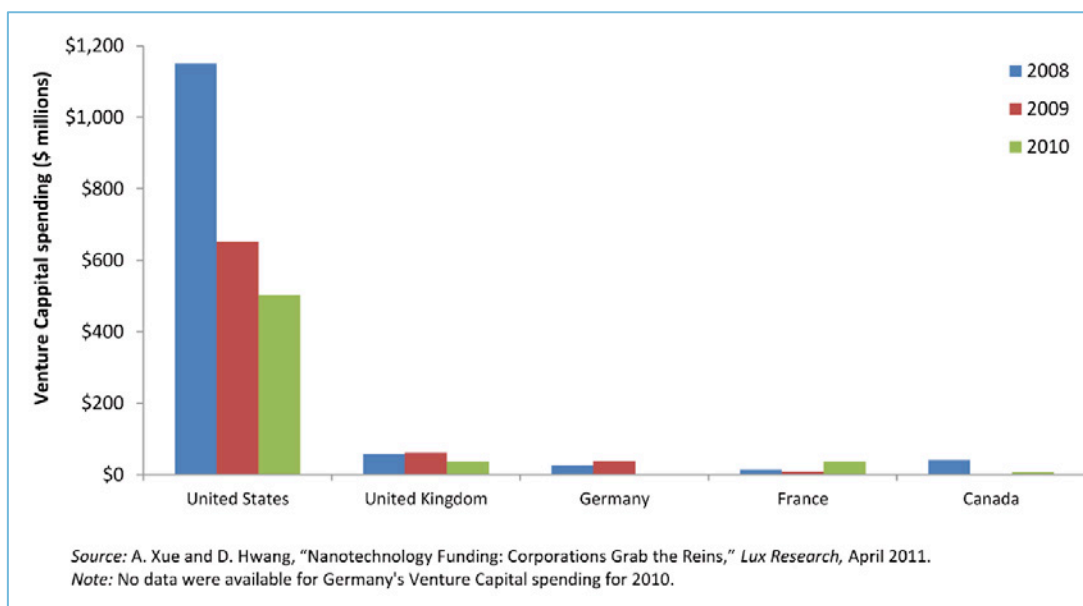


Figure 3. Les financements liés aux nanotechnologies dans le capital risque (5 plus grands pays ; 2008-2010).

Source : Reproduit de PCAST, 2012

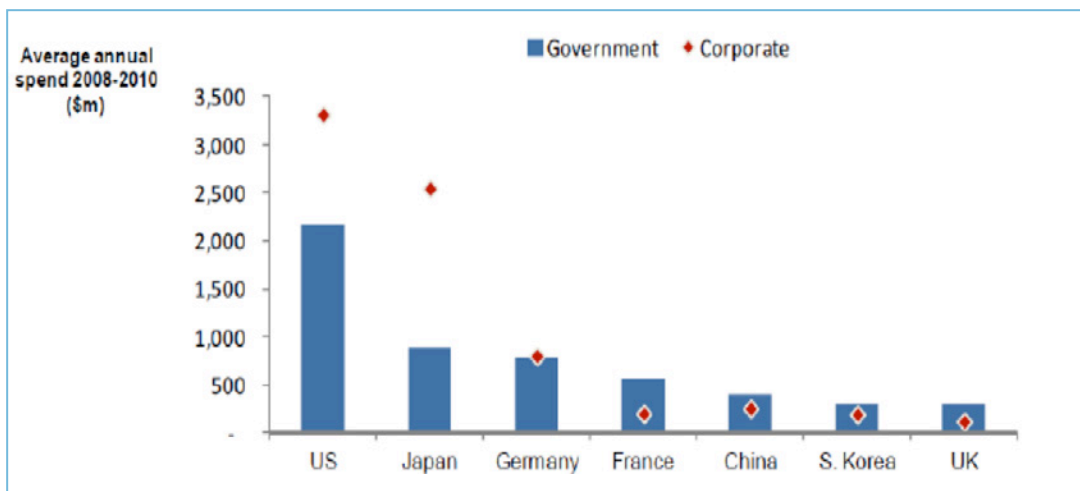


Figure 4. La comparaison investissements publics/privés par pays.

Source : Reproduit de PCAST, 2012

La figure 4 reprend des éléments précédemment cités et montre deux grandes tendances :

- les États-Unis et le Japon dominent largement la scène en termes d'investissements tant publics que privés ;
- les structures de financement peuvent être très différentes selon les pays. On observe trois grandes catégories :
 - pays au fort financement privé (États-Unis/Japon),
 - pays aux financements partagés (Allemagne/Corée du Sud/Chine),
 - pays où les financements publics dominent (France/Royaume-Uni).

Investissements multisectoriels dans les technologies

Comme l'indique le tableau 2, les investissements dans les nanotechnologies concernent tous les secteurs d'activités ; ils ne sont pas spécifiques à une industrie. Les nanotechnologies sont bien des *general purpose technologies*. Le tableau 2 se base sur les brevets incorporant des nanotechnologies (base PATSTAT) ; les investissements dans les nanotechnologies peuvent se traduire par des brevets¹. Avec toutes les limites que cet indicateur comprend², on peut néanmoins observer de grandes tendances (figure 5).

¹ Les brevets ne sont pas uniquement des indicateurs de l'investissement privé, car des institutions publiques déposent aussi des brevets.

² Les brevets comme indicateurs de l'investissement en R&D ont de nombreuses limites :

- les brevets ne sont qu'un indicateur « de sortie » des investissements en R&D,
- tous les résultats de recherche ne donnent pas lieu à des brevets,
- les habitudes de publications sont différentes en fonction des pays. Une comparaison stricte est donc impossible, les brevets n'ont pas tous la même valeur.

Field of firms	Total des brevets	Total des brevets liés aux nanos	% des brevets en nano
Electronic & electrical equipment	103	70	68 %
Technology hardware & equipment	226	150	66 %
Chemicals	96	84	88 %
Pharmaceuticals & biotechnology	153	73	48 %
Health care equipment & services	53	39	74 %
Automobiles & transport	86	59	69 %
Aerospace & defence	35	24	69 %
Materials & construction	55	42	76 %
Oil, Gas & Electricity	53	39	74 %
Food producers inc. Beverages	32	16	50 %
General industrials	38	24	63 %
Household & personal goods	40	21	53 %
Industrial engineering	70	35	50 %
Telecom & media	32	14	44 %
Software & computer services	110	14	13 %
Banks, insurance, retail, leisure	49	6	12 %
Total	1231	710	58 %

Tableau 2. La présence des plus grands industriels (DTI scoreboard) dans les nanotechnologies sur la base de l'étude des brevets.

Source : DTI scoreboard and Nanobench/ Nanotrenchart project, 2009

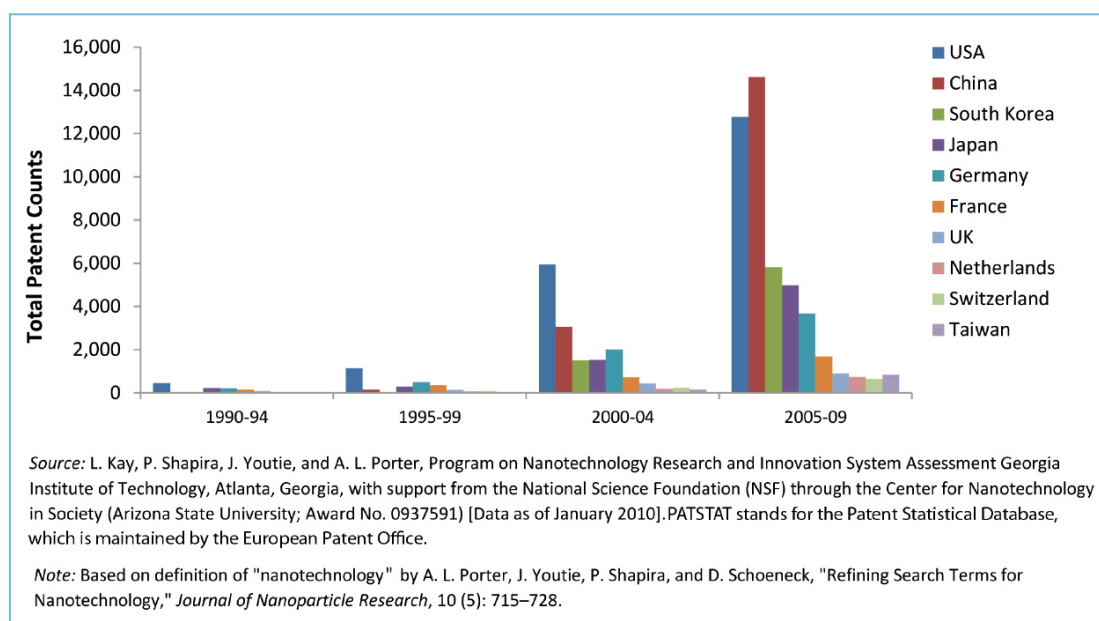


Figure 5. Nombre de brevets déposés en nanotechnologies dans la base PATSTAT par pays d'origine 1990-2009.

Source : Reproduit de PCAST, 2012

Le nombre de brevets déposés croît largement depuis les années 1990. Deux phénomènes sont à noter : tout d'abord la part totale des États-Unis décroît sur la dernière période, tandis que la Chine passe en première position. Ensuite, de nouveaux pays, hors de la triade Europe/États-Unis/Japon font leur entrée dans les années 2000 : la Chine, la Corée du Sud et Taiwan (figure 5). La France se situe en 6^{ème} position en nombre de brevets sur les 10 dernières années derrière la Chine, les États-Unis, la Corée du Sud, le Japon et l'Allemagne. Sur cette période, la Chine et la Corée du Sud ont eu la plus grande croissance.

Considérant les limites des brevets comme indicateurs, il est utile de s'intéresser uniquement aux brevets prioritaires. Le brevet prioritaire représente la paternité d'une famille de brevets technologiques. L'analyse en termes de brevets prioritaires donne une meilleure image de la répartition de la propriété intellectuelle. Ainsi, si la Chine dispose du plus grand nombre de brevets, elle n'apparaît qu'au 8^{ème} rang en termes de possession de brevets prioritaires (figure 6).

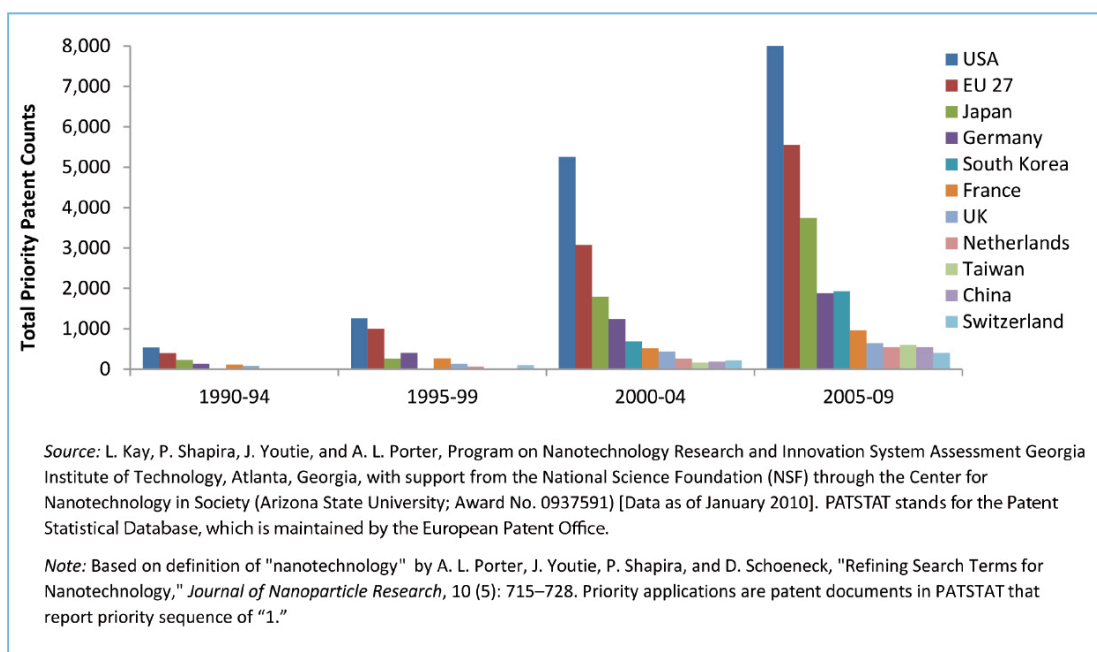


Figure 6. Nombre de brevets prioritaires déposés en nanotechnologies dans la base PATSTAT par année et par pays d'origine 1990-2009.

Source : Reproduit de PCAST, 2012

Néanmoins, si le nombre total de brevets déposés augmente continuellement, un plateau est observé depuis 2006 : les chercheurs du *NanoBench project* évoquent l'impact des incertitudes (scientifiques, technologiques mais aussi toxicologiques et sociétales) sur le dépôt de brevets.

Des productions scientifiques en forte croissance

La figure 7 présente les résultats des investissements dans les nanosciences par le nombre de publications dans les journaux scientifiques³. Les publications traduisent un investissement dans la recherche, qui est essentiellement financée par les gouvernements. La croissance des publications sur la période étudiée est de l'ordre de 14 % par an alors que la moyenne est de 3 %. Ces chiffres montrent l'engouement autour des nanosciences. Cette évolution est à mettre en parallèle avec l'évolution des financements publics.

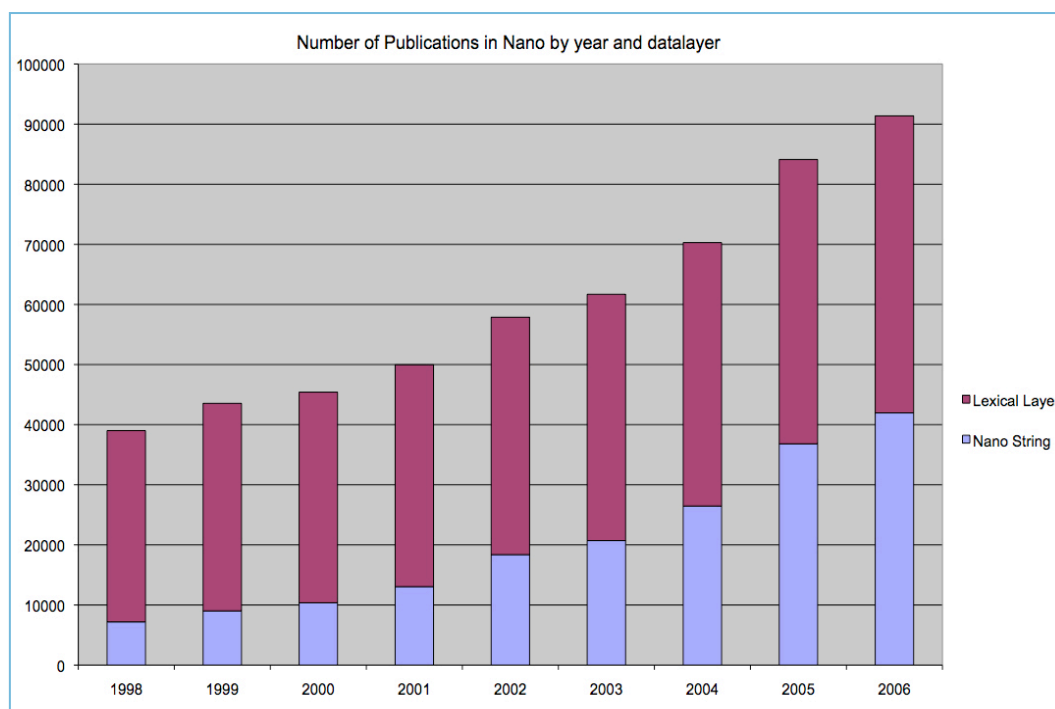


Figure 7. Les publications nanos dans le Web of Science 1998-2006.

Source : Nanobench/ Nanotrendchart project, 2008

Prospective

Plusieurs éléments peuvent avoir un impact sur l'évolution de la variable. Le premier élément concerne le montant global des financements disponibles. En effet, dans un contexte de crise, les investissements dans la R&D peuvent diminuer, sauf si les nanosciences et les nanotechnologies sont considérés comme une priorité. Les incertitudes concernant la toxicité et l'écotoxicité des nanomatériaux est un autre point à considérer : tant que ces incertitudes n'auront pas été levées, les entreprises pourront être hésitantes à investir dans le champ, se traduisant par des baisses d'investissements privés. Par contre, ces incertitudes peuvent faire augmenter les financements publics. Les incertitudes ne sont pas seulement scientifiques, elles sont aussi sociétales comme les

³ Pour le détail de la méthodologie, voir Mogoutov et Kahane, 2007.

nombreux débats publics l'ont montré. Les questions philosophiques, éthiques restent très présentes dans le domaine. La question de l'utilité de certaines innovations reste à l'ordre du jour.

La question de la réglementation peut également influencer sur l'évolution des financements, notamment privés : l'absence de réglementation induit de l'incertitude pour les industriels sur les contraintes mises sur les marchés. Tant qu'il existera une incertitude, les investissements privés seront plus limités.

Enfin, la maturité des marchés émergents (Chine, Inde, Brésil) mène à une augmentation de la demande de biens (y compris de biens incorporant des nanotechnologies), ce qui peut également influencer la variable.

Hypothèses

Hypothèse 1. Continuation des financements et développement des applications

Cette hypothèse considère que les investissements dans le champ des nanosciences et technologies se poursuivent. Les incertitudes ne seront plus aussi nombreuses qu'en 2014 ce qui permettra aux industriels d'investir dans les applications et de proposer de plus en plus de produits issus des recherches menées dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies. De fait, ce type de financement deviendra plus important que les financements publics, qui sont eux, plus focalisés sur la recherche fondamentale.

Hypothèse 2. Ralentissement des financements

Cette hypothèse considère que pour différentes raisons (crise des financements, incertitudes sur la toxicité, rejet de la population...), les investissements sont en baisse. Ces baisses concernent tant les pouvoirs publics que les entreprises.

Hypothèse 3. Focalisation des financements sur des enjeux particuliers (eau, alimentation...)

Cette hypothèse considère que les investissements dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies diminuent. Cependant, certaines circonstances, comme des enjeux spécifiques liés au développement ou pour faire face à la croissance de la population mondiale, vont focaliser les financements publics et privés autour de certaines thématiques.

Références

President's Council of Advisors on Science and Technology , 2012, Report to the President and Congress on the Fourth Assessment of the National Nanotechnology Initiative, 64 p.

Nanobench / Nanotrendchart project, 2008 :

http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-07-NANO-0026

O'Rourke, Morrison DSTI/STP/Nano (2012), rapport disponible à :

[http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=DSTI/STP/NANO\(2013\)3/FINAL&docLanguage=En](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=DSTI/STP/NANO(2013)3/FINAL&docLanguage=En)

Le transfert technologique

Myriam Ricaud, INRS

Définition

L'économie de l'innovation est fondée sur des relations durables et fécondes entre l'enseignement, la recherche et l'innovation. C'est le modèle dit du « triangle de la connaissance ». La recherche contribue au développement économique par la création d'entreprises - les *start-up* et *spin-off* - et par des transferts de technologies vers des entreprises existantes, dont les PME¹.

Le transfert technologique est le processus désignant le transfert formel à l'industrie de découvertes résultant de la recherche académique ou privée dans le but de les commercialiser sous la forme de nouveaux produits ou de nouveaux services. Le transfert technologique consiste en un échange de connaissances, de compétences, de techniques ou de savoir-faire d'une organisation à une autre. Il peut donner lieu à une transaction financière et se matérialiser de différentes façons : achat de brevet, coopération, mise à disposition de ressources humaines et matérielles, etc.

En France, selon le ministère chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, le montant total des dépenses de recherche et développement est de l'ordre de 42 milliards d'euros (Md€) par an². Sur ce montant, la recherche fondamentale représente environ 15 Md€, c'est un point fort reconnu de notre pays. De son côté, le développement industriel représente 25 Md€ environ, situant la France dans la bonne moyenne (selon le ministère chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche). Un goulot d'étranglement se situe entre ces deux pôles, recherche fondamentale et développement industriel : la France ne consacre que 2 à 3 Md€ à l'étape de maturation et de transfert technologiques, soit environ 7 % du montant total des dépenses de recherche et développement, contre 22 % pour les États-Unis par exemple².

L'effort financier de la France dans le domaine des nanotechnologies et des nanomatériaux manufacturés place le pays au 2^{ème} rang européen derrière l'Allemagne³.

¹ Petites et moyennes entreprises

² Valorisation & transfert technologique. CEA, acteur de l'innovation industrielle, avril 2014

³ <http://www.economie.gouv.fr/cedef/dossier-documentaire-nanotechnologies>

Les États-Unis sont actuellement leader en matière d'investissement dans ce secteur, ainsi qu'en termes de production scientifique et de valorisation de la recherche.

Rétrospective et situation actuelle

Les nanomatériaux manufacturés diffusent dans de très nombreux secteurs d'activité. Ils ont rapidement été identifiés comme des technologies clés génériques, aussi appelées *Key enabling technologies*, KET. Ils sont indispensables à la fabrication d'une vaste gamme d'applications à forte valeur ajoutée.

C'est la raison pour laquelle, dès la fin des années 1990, à l'instar des États-Unis avec la création en 2000 de la *National nanotechnology initiative* (NNI), la France a pris de nombreuses mesures en vue de construire sa stratégie relative à la recherche, au transfert et au développement industriel des nanotechnologies et des nanomatériaux manufacturés.

Le ministère chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche a ainsi créé en 1999 une structure spécifiquement chargée de promouvoir la recherche notamment partenariale et le transfert des nanomatériaux vers l'industrie : le Réseau français de recherche de soutien au développement de projets en micro et nanotechnologies (RMNT). Le RMNT, après avoir été fusionné avec l'Action concertée initiative (ACI) Nanosciences⁴ pour donner naissance au Réseau national en nanosciences et nanotechnologies (R3N), a cessé ses activités avec la création de l'Agence nationale de la recherche (ANR). La mission de l'ANR, plus globale, est la mise en œuvre du financement sur projets avec l'objectif de dynamiser le secteur de la recherche. Depuis 2005, l'ANR propose régulièrement des appels à projets de recherche partenariale en lien avec les nanomatériaux, les nanotechnologies et les nanosciences notamment dans le cadre des programmes PNANO (Programme nanosciences et nanotechnologies) et P3N (Programme nanosciences, nanotechnologies et nanosystèmes). Le ministère chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche a également lancé en mai 2009 le plan Nano-INNOV visant à mettre en place une stratégie d'innovation dans les nanotechnologies et nanomatériaux. Ce plan repose sur la création de centres d'intégration des nanotechnologies et nanomatériaux à Grenoble, Saclay et Toulouse, où la recherche fondamentale est amenée à œuvrer avec des entreprises dans l'objectif de mettre au point des technologies, de déposer des brevets et d'élaborer des produits. S'ajoutent également la création du Réseau pour la recherche technologique de base (RTB)⁵ en 2003 et de six centres de compétence en nanosciences nommés C'Nano⁶ en 2004 (C'Nano est, par exemple, à l'initiative avec le LNE⁷ de la création en 2012 du club Nanométrie⁸ dont l'un des objectifs est d'établir une passerelle entre le monde industriel et l'univers académique par la mise en commun de problématiques métrologiques associées aux nanomatériaux).

⁴ L'Action concertée initiative Nanosciences a été lancée en 2002 pour soutenir les projets de recherche fondamentale à travers des partenariats entre les laboratoires académiques

⁵ <http://www.rtb.cnrs.fr/rubrique1.html>

⁶ <http://www.cnano.fr>

⁷ Laboratoire national de métrologie et d'essais

⁸ <http://club-nanometrologie.fr>

Outre ces quelques organismes ou réseaux, la plupart des acteurs impliqués actuellement en France dans le transfert technologique des découvertes associées aux nanomatériaux manufacturés ne sont globalement pas spécifiques à cette filière. Ils sont nombreux, variés et répartis sur l'ensemble du territoire :

- les Sociétés d'accélération du transfert de technologies (SATT), créées en 2011 à l'initiative du Programme des investissements d'avenir avec pour objectifs la valorisation de la recherche académique et l'amélioration du processus de transfert de technologies vers les entreprises. Il existe 14 SATT réparties sur le territoire français regroupant plus de 250 personnes spécialisées en propriété intellectuelle, en ingénierie de projets technologiques, en droit, en marketing et en développement commercial ;
- les Instituts de recherche technologique (IRT) issus également du Programme des investissements d'avenir qui sont des entités thématiques interdisciplinaires rassemblant les compétences de l'industrie et de la recherche publique dans une logique de co-investissement public-privé et de collaboration étroite ;
- les instituts Carnot. Le label Carnot, créé en 2006, permet d'identifier les laboratoires publics s'étant engagés en faveur de la recherche partenariale avec les entreprises. Le réseau compte actuellement 34 instituts dans toute la France et représente aujourd'hui plus de 27 000 chercheurs. 65 entreprises sont essaimées par an du réseau Carnot et 970 brevets prioritaires ont été déposés en 2012 ;
- les Sociétés de recherche sous contrat (SRC). Ces structures privées, au nombre de 43, ont pour activité principale de réaliser des travaux de recherche et de développement pour le compte de TPE⁹, de PME, d'ETI¹⁰ ou de grandes entreprises ;
- les structures labellisées, depuis 2007 par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, CDT, Cellule de diffusion technologique (structures légères chargées de prospecter les TPE et PME afin de les sensibiliser à l'innovation, de les aider à formaliser leurs problématiques technologiques et de les mettre en relation avec les centres de compétence), CRT, Centre de ressources technologiques (centres effectuant des missions de prestations technologiques pour répondre aux besoins des TPE et PME) et PFT, Plate-forme technologique (plateformes situées dans des établissements d'enseignement qui mettent leurs équipements et compétences au service des TPE et PME). Il existe actuellement 200 CDT, CRT et PFT sur le territoire français ;
- les pôles de compétitivité qui rassemblent, depuis 2005, sur un territoire bien identifié et sur une thématique ciblée, des entreprises, petites et grandes, des laboratoires de recherche et des établissements de formation dans l'objectif de développer la croissance et l'emploi ;
- les incubateurs dont la mission est de détecter, d'accueillir et d'accompagner les projets de création d'entreprises innovantes, les pépinières qui hébergent de jeunes entreprises et fournissent des services notamment matériels et les technopôles qui assurent le support de la politique de développement d'un territoire à partir de l'innovation ; l'ensemble de ces acteurs de l'innovation étant coordonné par l'association Retis ;
- le réseau Curie qui assure la promotion et l'accompagnement des structures de transfert de résultats de recherche issues du secteur public vers les entreprises. Ses membres, plus de 150, sont des institutions françaises œuvrant dans le domaine de la

⁹ Très petites entreprises

¹⁰ Établissements de taille intermédiaire

recherche publique, telles que des universités, des CHU¹¹, des grandes écoles ainsi que des organismes nationaux de recherche ;

- les centres techniques industriels qui fonctionnent avec l'appui des organisations professionnelles et interviennent en support d'une filière industrielle généralement caractérisée par une forte part de TPE et PME. Il existe 14 centres techniques en France ;
- les chambres de commerce et d'industrie...

Plusieurs organismes tels que l'Inserm (Inserm transfert), le CNRS (France innovation scientifique et transfert, FIST SA), l'Institut Curie (Direction des brevets et des partenariats industriels), le CEA (CEA Tech), etc. disposent également d'une cellule interne de valorisation de leurs travaux de recherche.

Parmi les 71 pôles de compétitivité répartis sur le territoire français, deux pôles nommés Elastopôle et Materialia ont comme thématiques principales les nanomatériaux. Le pôle Materialia, situé dans l'Est de la France, compte 25 grandes entreprises, 68 PME, 18 organismes de recherche et de formation. Le pôle Elastopôle, localisé en région Centre, regroupe 56 grandes entreprises, 42 PME, 8 organismes de recherche et 17 centres de formation. Deux pôles de compétitivité ont également comme thématique principale les nanotechnologies, le pôle Minalogic, établi en région Rhône-Alpes, qui rassemble 29 grandes entreprises, 145 PME, 6 organismes de recherche et 6 centres de formation et le pôle Microtechniques situé dans le Doubs qui compte 65 grandes entreprises, 61 PME, 12 organismes de recherche et 7 centres de formation. D'autres pôles de compétitivité comme les pôles Aerospace Valley, Cosmetic Valley, Optique et photonique, Lyonbiopôle, etc. assurent également la valorisation de travaux de recherche ayant un lien plus ou moins fort avec les nanomatériaux manufacturés.

Plusieurs instituts Carnot ont comme axes de travail les nanomatériaux, par exemple les instituts CIRIMAT et LAAS en région Midi-Pyrénées, les instituts CEA Leti, Ingénierie@Lyon et PolyNat en région Rhône-Alpes, l'institut Mica en Alsace, l'institut Chimie Balard dans l'Hérault, l'institut Mines en Ile-de-France, etc.

De même, plusieurs sociétés de recherche sous contrat telles que Armines ou Rescoll ainsi que plusieurs centres techniques industriels comme le Centre technique des industries aérauliques et thermiques (CETIAT), le Centre technique des industries mécaniques (CETIM) qui est également un institut Carnot, et l'Institut français de l'habillement et du textile (IFTH) proposent de promouvoir les travaux de la recherche universitaire associés aux nanomatériaux et de les rendre plus valorisables.

Il existe enfin quelques structures privées spécifiquement dédiées au transfert de technologies relatives aux nanomatériaux manufacturés en France telle que la plateforme CANOE¹² (CANOE est une plateforme de transfert technologique qui propose des moyens humains et matériels mutualisés en vue d'accompagner le développement du tissu économique aquitain dans le domaine des matériaux nanostructurés).

Des initiatives en Europe peuvent également être rapportées telles que le réseau européen de transfert de connaissances relatives aux nanomatériaux carbonés utilisés

¹¹ Centre hospitalier universitaire

¹² Centre technologique aquitain des matériaux avancés et des composites

dans les secteurs de l'automobile et de la construction nommé *Carbon Inspired*¹³ créé en 2011 ou le programme NANO4M (*Nanotechnology for market, 2008-2011*) qui avait pour ambition de définir de nouvelles méthodes de transfert et de développer des opportunités économiques émergentes (ce projet associait 12 partenaires académiques et institutionnels issus de quatre régions d'Europe : Toscane, Rhénanie du Nord-Westphalie, Asturies et Lorraine).

Le transfert technologique impose à toutes ces structures la mise en œuvre coordonnée de divers outils : l'analyse du marché potentiel (segments, volumes, dynamisme, etc.), l'identification des éléments constitutifs de la technologie objet du transfert, l'analyse de la propriété intellectuelle (marque, droit d'auteur, savoir-faire, dessins, modèles et brevets), la caractérisation du cadre réglementaire et juridique, le choix du type de transfert de technologie adapté au contexte et aux objectifs (cession de brevet, communication de savoir-faire, projets de R&D en partenariat, accords de coopération technique, formation, création de joint-ventures, création de *spin-off*, rachat d'entreprises), le calcul de la valeur économique du transfert ainsi que l'ingénierie financière du transfert.

Malgré la présence de très nombreuses structures publiques ou privées œuvrant à la valorisation et au transfert des résultats de la recherche associée au développement des nanomatériaux vers les marchés, le passage à l'étape de production semble être délicat à franchir notamment pour les PME (qui représente plus de 60 % des entreprises actives dans le domaine des nanomatériaux manufacturés en France selon l'enquête réalisée en 2011 et mandatée par la Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services¹⁴).

Ce constat s'explique tout d'abord par le fait que les structures impliquées dans le transfert technologique sont certes nombreuses mais elles sont également plus ou moins bien structurées, leurs missions parfois redondantes et leurs objectifs souvent assez imprécis.

Par ailleurs, le passage à l'étape de production requiert d'importants investissements en termes par exemple de machines et d'équipements mais également de foncier. En effet, l'ensemble des travaux afférents à la démonstration de la viabilité industrielle et économique des solutions innovantes développées reste à la charge des entreprises, petites ou grandes. Or, bien souvent, les PME françaises ne disposent pas des ressources à la fois financières, techniques et de management nécessaires à la prise en charge de tels projets de longue durée (typiquement 2 à 5 ans) qui ne sont plus de la recherche, bien que nécessitant d'en maîtriser les éléments, sans être encore au stade industriel, bien que nécessitant des investissements du même ordre. De surcroît, les débouchés de ces nouveaux matériaux induisent le besoin d'approches multisectorielles auxquelles les PME ne sont pas toujours préparées. De ce fait, le niveau de risque associé à cette phase en fait à la fois une des causes premières de mortalité des start-up et *spin-off* en même temps qu'un obstacle souvent insurmontable au développement de filières innovantes dans les PME plus traditionnelles.

Il semble ainsi manquer un chaînon de financement public et/ou privé pour atteindre l'industrialisation. Le financement des entreprises innovantes, *start-up* ou *spin-off*, ne

¹³ <http://carboninspired.com/?lang=fr>

¹⁴ Les réalités industrielles dans le domaine des nanomatériaux en France. Analyse de la réalité du poids des nanomatériaux dans la filière industrielle concernée, Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services, juin 2012

semble pas encore totalement ancré dans le mode de pensée des investisseurs en France. Alors que dans le cadre de leurs activités de recherche et de développement, les petites entités tout comme les grandes entreprises peuvent solliciter de nombreuses aides financières au premier rang desquels le crédit d'impôt recherche.

Il convient, également, de noter la frilosité de certains industriels français à s'impliquer concrètement tant dans le financement de la recherche que dans l'application industrielle des découvertes. La part de l'investissement privé dans la R&D dans le domaine des nanomatériaux se situait en 2007 autour de 30 % (moyenne européenne), bien inférieure à celle de l'Allemagne qui se distingue par une implication du secteur privé s'élevant à 70 %. Aux États-Unis, cette part est de 60 %¹⁵.

Enfin, il existe parfois une inadéquation entre la recherche académique et le tissu industriel local en France, ce qui peut être un réel obstacle à l'efficacité du transfert technologique.

Prospective

La recherche nationale dans le domaine des nanotechnologies et des nanomatériaux manufacturés est très réputée. L'effort public est de plus en plus conséquent (pour l'année 2007, il était de l'ordre de 280 millions d'euros¹⁶). En revanche, la capacité à transformer ces recherches en réussites industrielles, et donc en emplois et en croissance, demeure encore limitée.

En effet, la France démontre une faiblesse dans la valorisation de la recherche, qui se traduit par un déficit de transfert de technologie vers le tissu industriel.

Cette faiblesse est confirmée par l'absence de la France dans le classement mondial établi par le Centre d'analyse stratégique Centifica¹⁷ en juillet 2011 et fondé sur la conversion des découvertes en produits commercialisables. Dans ce classement, les États-Unis confirment leur leadership, suivi dans l'ordre de la Chine, la Russie, l'Allemagne, le Japon, l'Union européenne, la Corée du Sud, Taïwan, le Royaume-Uni et l'Inde.

Cette inclination est également étayée par le fait que les 2/3 des brevets déposés dans ce secteur sont détenus par l'Asie (Chine, Japon et Corée du sud), distançant nettement les États-Unis et l'Europe. L'Allemagne totalise les 2/3 des brevets européens devant la France et le Royaume-Uni. Les déposants sont principalement des industriels (à hauteur de 70 %) et plus particulièrement des entreprises multinationales¹⁸.

De surcroît, il est à noter que le nombre de *start-up* et de *spin-off* dans le secteur des nanomatériaux manufacturés en France est nettement plus faible en comparaison des États-Unis, de la Chine ou du Japon. Il semble que les modes d'incitation à leur création ne soient

¹⁵ Conseil national de la consommation, juin 2010

¹⁶ <http://www.economie.gouv.fr/cedef/dossier-documentaire-nanotechnologies>

¹⁷ Global funding of nanotechnologies and its impact, Cientifica, juillet 2011 (<http://cientifica.com/wp-content/uploads/downloads/2011/07/Global-Nanotechnology-Funding-Report-2011.pdf>)

¹⁸ Les nanotechnologies, Conseil économique et social, 2008

pas appropriés ou n'aient pas encore porté leurs fruits. Le manque de mobilisation et d'appétence des investisseurs en capital risque dans ce domaine en France est ainsi marqué.

Compte tenu des enjeux économiques, l'effort français, notamment public, devrait dans les prochaines années s'intensifier dans l'objectif de faciliter la création et l'essor d'entreprises innovantes dans le secteur des nanomatériaux manufacturés afin de développer l'emploi.

Un support appuyé à l'organisation de communautés publiques et privées ainsi que de passerelles entre elles pour un meilleur ciblage des travaux de recherche et l'accélération des transferts notamment vers les PME / ETI paraît également se dessiner.

Des laboratoires communs entre les organismes de recherche académique et les PME / ETI voient ainsi le jour tels que par exemple le Laboratoire des sciences et technologies des nanomatériaux implanté à Nancy¹⁹ et soutenu en partie par l'ANR depuis mars 2014. Les interactions entre les structures de recherche publique et les entreprises privées y sont d'autant plus consolidées qu'une partie des locaux et équipements est dédiée aux partenaires industriels afin de permettre un réel transfert technologique. Plusieurs laboratoires du CEA se présentent également comme des centres de transfert entre recherche amont et industrie (tels que le Liten qui a essaimé quatre start-up spécialisées dans les nouvelles technologies de l'énergie).

Enfin, est entré en vigueur le 1^{er} janvier 2014, le nouveau programme européen de financement de la recherche et de l'innovation nommé Horizon 2020²⁰. Ce programme, doté de 79 milliards d'euros, regroupe les financements de l'Union européenne pour la période 2014-2020 en matière de recherche et d'innovation et s'articule autour de trois grandes priorités : l'excellence scientifique, la primauté industrielle et les défis sociétaux. Parmi les primautés industrielles figurent les nanotechnologies et nanomatériaux (primauté industrielle nommée NPM : nanotechnologies, matériaux et production). Ce programme vise à encourager les progrès scientifiques et technologiques, en favorisant leur intégration dans des produits et services compétitifs pour toute une série d'applications et de secteurs. 20 appels à projet relatifs aux nanomatériaux ont été lancés en décembre 2013.

Hypothèses

Hypothèse I. Le transfert technologique est bien structuré et efficace

Un soutien notamment public important est alloué à la valorisation des résultats de la recherche associée au développement des nanomatériaux manufacturés, un transfert de technologies vers l'ensemble des marchés bien organisé, rapide et efficace se développe avec des échanges entre industrie et monde académique nombreux et fructueux.

¹⁹ Laboratoire associant le CNRS, l'université de Lorraine et l'entreprise Vinci Technologies

²⁰ <http://www.horizon2020.gouv.fr>

Hypothèse 2. Le transfert technologique s'effectue avec difficultés

Les structures publiques et privées dédiées à la valorisation des résultats de la recherche associée au développement des nanomatériaux manufacturés sont nombreuses mais peu structurées, leur action est modérée, le transfert de technologies vers les marchés s'effectue avec difficultés.

Hypothèse 3. Le transfert technologique est orienté vers quelques marchés stratégiques

Des structures publiques, mais également privées, vouées à la valorisation des résultats de la recherche associée au développement de certains nanomatériaux manufacturés à forts enjeux économiques sont mises en place, un transfert de technologies orienté vers une sélection de marchés stratégiques et porteurs associés se déploie.

Les réseaux de compétences

Jean-Raymond Fontaine, INRS

Définition

Le réseau de compétences a comme objectif de créer et de structurer une communauté d'intérêts en nanotechnologies pour favoriser la recherche, le développement de produits et services ainsi que leur commercialisation.

Il existe de nombreux réseaux de compétences en France très souvent structurés autour du tissu universitaire et industriel régional.

Exemples de réseaux de compétence

Pôles de compétitivité

Dans une économie mondiale de plus en plus concurrentielle, la France a lancé en 2004 les pôles de compétitivité pour développer la capacité d'innovation, la croissance et l'emploi sur les marchés porteurs.

Un pôle de compétitivité rassemble sur un territoire bien identifié et sur une thématique ciblée, des entreprises, petites et grandes, des laboratoires de recherche et des établissements de formation. Les pouvoirs publics nationaux et locaux sont étroitement associés à cette dynamique.

Il existe 71 pôles de compétitivité en France dont plusieurs œuvrent à développer et faciliter les innovations dans le domaine des nanotechnologies :

- **Lyonbiopôle** : il met au point des produits et services autour des solutions miniaturisées intelligentes (micro-nanotechnologies et intelligence logicielle embarquée)¹.

¹ <http://www.lyonbiopole.com>

- **Minalogic** : situé à Grenoble, il propose des solutions miniaturisées intelligentes (micro-nanotechnologies et intelligence logicielle embarquée) pour l'industrie².
- **Microtechniques** : situé à Besançon, il est centré autour d'un savoir-faire technologique, issu notamment de l'horlogerie. Ses productions concernent les cartes à puces, les téléphones, les relais de télédiffusion, les paramètres, les satellites, les pacemakers, les roues, les tableaux de bord et les moteurs des avions et automobiles...³
- **Optique et photonique (POPSUD)** : situé dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, il est spécialisé dans les systèmes complexes d'optique et d'imagerie dédiés aux milieux hostiles⁴.
- **Sciences et systèmes de l'énergie électrique (S2E2)** : situé dans les régions Centre-Limousin qui vise l'ensemble de la chaîne de valeur de l'énergie électrique⁵.
- **Solutions communicantes sécurisées (SCS)** : situé dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, ce pôle de compétitivité intègre des matériels et des logiciels pour transmettre, échanger et traiter des informations de manière sécurisée et fiable⁶.

Centres de compétence (universités et CNRS) C'NANO

Six centres de compétence en nanosciences C'Nano⁷ créés en 2004 bénéficient de l'appui d'un réseau d'établissements d'enseignement supérieur et d'entreprises pour la production d'innovations technologiques nécessaires à l'industrie.

Les six centres de compétences C'Nano maillent l'ensemble du territoire français et fédèrent l'ensemble des 290 laboratoires comprenant 560 équipes de recherche académique travaillant dans les nanosciences ainsi que 48 universités et 44 écoles d'ingénieurs ou professionnelles françaises. C'Nano fédère actuellement près de 7 000 chercheurs, enseignants-chercheurs, post-doctorants, doctorants et personnels techniques de différentes disciplines de sorte que tous les aspects des nanosciences, des sciences dures aux sciences humaines et sociales, peuvent être traités au sein du réseau.

RENATECH qui regroupe 6 grandes plateformes de fabrication

La spécificité de la recherche en nanosciences en France tient au fait qu'elle s'appuie sur un réseau très dense de structures technologiques spécifiques nécessaires aux applications.

Un réseau national de grandes centrales de technologie pour la Recherche technologique de base (RTB) a été initié dès 2003 par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche ; il met en œuvre un plan de soutien à un réseau de centrales de nanofabrication et permet aux équipes de recherche des laboratoires d'utiliser un ensemble de méthodes de nano-fabrication compétitives au niveau mondial.

² <http://www.minalogic.com>

³ <http://www.polemicrotechniques.fr>

⁴ <http://www.popsud.org>

⁵ <http://www.s2e2.fr>

⁶ <http://www.pole-scs.org>

⁷ <http://www.cnano.fr/spip.php?rubrique5>

Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) coordonnent ce réseau national où sont développées cinq thématiques :

- intégration de technologies et systèmes hétérogènes,
- micro- nano- et bio- systèmes,
- micro-nanoélectronique et électronique ultime,
- nanotechnologies, nanomagnétisme, nanomatériaux,
- optoélectronique et photonique.

Cinq pôles sont identifiés pour l'implantation des grandes centrales :

Le pôle Rhône-Alpes

Ce pôle comprend la centrale du CEA Leti et la Plateforme technologique amont (PTA). Les thématiques sont notamment la nanoélectronique quantique, le nanomagnétisme et l'électronique de spin, ainsi que l'interface entre biologie - nanoélectronique, nanophotonique, électronique moléculaire, nanosystèmes mécaniques et nanomatériaux, complétées par les principaux axes de recherche thèmes du Leti : microélectronique, systèmes photoniques et biochips.

Le pôle Rhône-Alpes intègre différentes structures sur plusieurs sites :

- le pôle Minatec, créé à l'initiative du CEA Leti Grenoble et de l'INP Grenoble qui rassemble 4000 personnes⁸.
- le site de Crolles avec l'implantation de la société STMicroelectronics, unique usine en 300 µm en nanoélectronique en France, avec environ 1 000 chercheurs, sur les architectures de transistors, de circuits intégrés, les procédés de fabrication et les méthodologies de conception. Ce centre fournit un service de fabrication de circuits expérimentaux aux laboratoires du monde entier⁹.
- la Fédération micro et nanotechnologies (FMNT) qui regroupe six laboratoires¹⁰.

Le pôle du Nord

Ce pôle comprend la centrale de l'Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie (IEMN) créé en 1992 par le CNRS, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL), l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC) et de l'Institut supérieur d'électronique et du numérique (ISEN). Il rassemble des physiciens, électroniciens et acousticiens étudiant notamment les matériaux et nanostructures, microtechnologies et microsystèmes, micro et optoélectronique...¹¹

Le pôle du Sud-Ouest

La centrale à Toulouse du Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS)¹², labellisé institut Carnot¹³, est une unité propre de recherche du CNRS

⁸ <http://www.minatec.org>

⁹ <http://www.st.com>

¹⁰ <http://fmnt.online.fr>

¹¹ <http://www.iemn.univ-lille1.fr>

¹² <http://www.laas.fr>

¹³ Le label Carnot permet d'identifier les laboratoires publics engagés dans la recherche partenariale avec les entreprises.

associée à l'université Paul-Sabatier-Toulouse 3, l'INSA et l'INP de Toulouse. Les activités de recherche du LAAS-CNRS réunissent 17 groupes de recherche à travers quatre pôles :

- le pôle Micro et nano systèmes (MINAS),
- le pôle Modélisation, optimisation et conduite des systèmes (MOCOSY).

Le pôle de l'Île-de-France

Trois établissements :

- la centrale du Laboratoire de photonique et de nanostructures (LPN). Le LPN est une unité propre du CNRS. Ses recherches couvrent les domaines du traitement quantique de l'information, des communications optiques, du traitement tout « optique du signal », du stockage à haute densité de l'information, ou dans celui de la microfluidique couplée à l'utilisation de nanostructures, domaine à l'interface de la physique, de la chimie et de la biologie¹⁴.
- la centrale de l'Institut d'électronique fondamentale (IEF). Unité mixte de recherche CNRS - université Paris Sud-XI, l'IEF est implanté sur le centre scientifique d'Orsay. Ses recherches portent sur la nanoélectronique silicium III-V (micro-nano-électronique à base de semi-conducteurs), le nanomagnétisme, la micro-nanophotonique, les microsystèmes et systèmes à dominante matériel et à dominante logiciel¹⁵.
- l'Institut d'optique graduate school (IOGS). Localisé sur le campus Polytechnique à Palaiseau et labellisé institut Carnot, l'Institut est spécialisé dans l'optique atomique et quantique, la nanophotonique, les matériaux non linéaires, les lasers, les systèmes optiques... Il est actuellement le premier centre occidental de formation en optique au niveau ingénieur et master par le nombre de diplômés¹⁶.

Le pôle Grand-Est

Ce pôle s'appuie sur la centrale de Franche-Comté électronique mécanique thermique et optique - Sciences et technologies (FEMTO-ST). Unité mixte de recherche du CNRS, il est rattaché à l'université de Franche-Comté (UFC), l'École nationale supérieure de mécanique et de microtechniques (ENSMM), et l'université technologique de Belfort-Montbéliard (UTBM). Ses recherches sont développées dans les domaines de la mécanique, de l'optique et des télécommunications, de l'électronique, du temps fréquence, de l'énergétique et de et de la fluïdique¹⁷.

Réseaux transnationaux

L'objectif des réseaux transnationaux est de faciliter l'entrée sur le marché de PME dans le domaine des nanotechnologies grâce aux croisements transnationaux des différents programmes d'aides, au développement de nouvelles structures transnationales de soutien, et à la mise en place de pôles de compétences transnationales.

¹⁴ <http://www.lpn.cnrs.fr>

¹⁵ <http://www.ief.u-psud.fr>

¹⁶ <http://www.institutoptique.fr>

¹⁷ <http://www.femto-st.fr>

Ainsi par exemple à travers le projet NANORA (Nano Régions Alliance), les acteurs clés des sept régions (Hesse (D), Sarre (D), Nord-Pas de Calais (F), Région de Cork (Ir), Wallonie (B), Pays-Bas (NL), Région de Lancaster (GB)) ont associé leurs forces dans le but de développer une réponse concertée pour le support à l'économie des nanotechnologies à un degré transnational.

Les programmes européens de recherche et développement

Les initiatives de l'Union européenne ayant trait à la recherche sont pilotées par les PCRD (Programme cadre de recherches et développement). À ce titre l'Union européenne a financé de nombreux projets européens (près de 2 000) dans le domaine des nanotechnologies.

Horizon 2020

Le programme Horizon 2020 regroupe les financements de l'Union européenne en matière de recherche et d'innovation et s'articule autour de trois grandes priorités : l'excellence scientifique, la primauté industrielle et les défis sociétaux.

Avec ce nouveau programme, l'Union européenne financera des projets résolument interdisciplinaires susceptibles de répondre aux grands défis économiques et sociaux. Il couvrira l'ensemble de la chaîne de l'innovation, depuis l'idée jusqu'au marché, et renforcera le soutien à la commercialisation des résultats de la recherche et à la créativité des entreprises.

Horizon 2020 est doté de 79 milliards d'euros pour la période de 2014-2020 afin de soutenir les travaux des acteurs de la recherche et de l'innovation (organismes, établissements d'enseignement supérieur et de recherche, entreprises...).

Dans ce programme, six technologies clés génériques (KET) sont positionnées comme étant les plus prometteuses :

- les nanotechnologies,
- la micro et nano-électronique,
- la biotechnologie,
- la photonique,
- les matériaux avancés,
- les systèmes de production/fabrication avancés pour la réalisation de composants à la pointe de la technologie, associant une ou plusieurs KET.

La stratégie 3S de la Communauté européenne

Dans le cadre de la prochaine programmation des fonds européens 2014-2020, l'Union européenne attend des régions qu'elles élaborent une stratégie de recherche et d'innovation de spécialisation intelligente (*smart specialisation strategy* dite 3S).

Cette stratégie de recherche et d'innovation doit permettre d'identifier un certain nombre d'activités novatrices qui participeront au développement économique régional pour les sept prochaines années. L'élaboration d'une 3S est un préalable à l'obtention des financements européens (FEDER). Les fonds FEDER seront en partie fléchés sur les domaines d'innovation remarquables pour leur potentiel de croissance.

L'enjeu est donc d'identifier les domaines d'innovation de la région pour que les acteurs de terrain (entrepreneurs, chercheurs...) partagent et proposent une vision commune

sur des projets collectifs d'activités nouvelles susceptibles de créer un développement économique significatif à moyen terme (à l'horizon 2020).

Les clusters d'entreprises

Les clusters sont des réseaux d'entreprises constitués majoritairement de PME et de TPE, fortement ancrés localement, souvent sur un même créneau de production et souvent à une même filière. L'intérêt premier du cluster est d'augmenter le chiffre d'affaire et l'efficacité économique de l'entreprise et ensuite de détecter dans son environnement les facteurs favorisant sa croissance.

Importance des partenariats pour les entreprises impliquées dans les nanotechnologies

Une enquête a été réalisée en 2011 par la Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services (DGCIS) sur les entreprises françaises engagées dans le domaine des nanotechnologies. Elle met en évidence plusieurs freins au développement du tissu industriel français, dont :

- la faisabilité industrielle : le passage de l'échelle laboratoire à l'échelle industrielle constitue un défi auquel l'industrie des nanomatériaux doit faire face aujourd'hui.

Afin de relever ce défi, deux points doivent être validés :

- la preuve de la réalité de la valeur ajoutée de l'utilisation de nanomatériaux dans les produits, notamment en termes d'amélioration des propriétés fonctionnelles ;
- la faisabilité technico-économique doit être prouvée, notamment lors du changement d'échelle. Un des freins constatés est en effet le manque de pilotes préindustriels validant les caractéristiques techniques des nanomatériaux à échelle industrielle et à un coût économiquement compétitif.

- la structuration de l'écosystème : ce frein concerne la structuration des différents maillons de la filière, caractérisés par une atomisation des acteurs.

Afin de favoriser l'émergence d'un écosystème structuré, plusieurs actions peuvent être envisagées telles que la mise en place de plateformes de soutien, le développement d'outils de partage des connaissances sur les résultats des projets R&D finalisés et en cours.

Clairement le renforcement des politiques de réseaux de compétences devrait permettre à terme la levée de ces verrous.

D'ailleurs la même enquête révèle que plus des deux tiers des entreprises de nanotechnologies entretiennent des partenariats avec des organismes français, qu'il s'agisse d'entreprises ou d'instituts de recherche, et la moitié avec des organismes étrangers. La moitié des entreprises engagées dans les nanotechnologies font partie d'un pôle de compétitivité.

Hypothèses

Hypothèse 1. Les développements sont impulsés par des réseaux nationaux en nanotechnologie

Suite aux politiques publiques nationales et aux besoins émanant des industriels, des réseaux de compétences spécifiques poursuivent leur développement essentiellement sur le territoire français.

Hypothèse 2. Les développements sont pilotés par des réseaux internationaux en nanotechnologie

Des réseaux de compétence spécifiques se développent à l'échelle européenne voire mondiale (les réseaux nationaux marquent le pas). En effet la complexité de la chaîne de développement (réalisation, validation industrielle, écotoxicologie...) des produits nécessite la répartition des investissements sur des réseaux transnationaux un peu à l'image de ce qui se fait dans le domaine de la fusion nucléaire par exemple. Le développement industriel est exponentiel et le centre décisionnel est au moins à l'échelle européenne voire mondiale en ce qui concerne la réalisation des produits et la gestion des risques associée. Une ou des structures transnationales existe(nt).

Hypothèse 3. Les réseaux spécifiques nanotechnologie disparaissent au profit de regroupements sectoriels

Il n'y a plus de réseaux de compétences spécifiques aux nanomatériaux ; les activités sont intégrées dans des réseaux plus globaux par secteur d'activité aux niveaux français et européen (par exemple Plastipolis, pôle de compétitivité en plasturgie).

Références

Il existe des cartes de compétence en nanotechnologie dans différents pays avec identification des réseaux, PME, centres de recherches, grandes entreprises...

- **Allemagne** : <http://www.nano-map.de> : 186 réseaux identifiés
- **États-Unis** : <http://www.nanotechproject.org/inventories/map/>, <http://www.nano.gov/>
- **Europe** : <http://www.nanofutures.info/regional-contacts> : liste des réseaux identifiés par pays par EU
- **France** : <https://www.nanothinking.com/> : service vendu par une startup française qui liste les entreprises mondiales impliquées dans les nanotechnologies

DGCIS : Les réalités industrielles dans le domaine des nanomatériaux en France, direction générale de la compétitivité de l'industrie et des services, Paris, juin 2012.

Le déploiement industriel des nanotechnologies et de la biologie de synthèse sur les territoires, précurseur des manufactures du futur. Rapport décembre 2013 pour le compte des ministères suivants : ministère de l'Économie et des Finances, ministère du Redressement productif, ministère de la Défense, ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt, ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, conseil général de l'environnement et du développement durable, inspection générale de l'administration de l'éducation nationale et de la recherche.

Analyse des risques et des intérêts potentiels associés aux nanotechnologies dans le domaine de la défense et de la sécurité : Étude prospective et stratégique (EPS), réalisée par la société EDMONIUM pour la Délégation aux affaires stratégiques, Paris, mars 2013.

Financement de la recherche et acteurs de la recherche en nanotechnologies en Allemagne, note du service pour la science et la technologie de l'Ambassade de France en Allemagne, mars 2005.

La recherche en nanosciences en France, campusfrance.org, mars 2013.

L'éducation et la formation

Cécile Dillic-Tissier, Carsat Alsace-Moselle, et Irina Guseva-Canu, InVS

Définition

Selon l'article L. 6111-1 du Code du travail, la formation professionnelle tout au long de la vie constitue une obligation nationale. Elle comporte une formation initiale et des formations ultérieures destinées aux adultes et aux jeunes déjà engagés dans la vie active ou qui s'y engagent. Ces formations ultérieures constituent la formation professionnelle continue qui est une obligation légale depuis 1971, ayant pour but d'assurer aux salariés, employés ou demandeurs d'emploi, une formation destinée à conforter, améliorer ou acquérir des connaissances professionnelles (source Insee).

Cette définition se distingue de la qualification professionnelle qui est la capacité à exercer un métier ou un poste déterminé, acquise soit par une formation ou un enseignement validés par un diplôme décerné par un organisme de formation reconnu, agréé par l'État ou non, soit par l'expérience personnelle ou professionnelle acquise sur le terrain. La formation par l'apprentissage, entre formation initiale et continue, permet de préparer des diplômes professionnels et technologiques de l'Éducation nationale tout en associant des périodes d'activité professionnelle en entreprise. Enfin, une compétence nécessite la maîtrise de différentes aptitudes et la faculté à les mobiliser pour résoudre des problèmes. En France, l'offre d'éducation émane principalement de l'État et le rôle des collectivités locales dans le secteur public s'accroît. L'Europe a un rôle d'orientation des politiques d'éducation et de formation et pousse vers l'harmonisation des dispositifs et des certifications.

Rétrospective

Contexte

L'évolution technologique et la complexification des tâches nécessitent de disposer d'opérateurs de plus en plus qualifiés et capables de mobiliser leurs connaissances pour prendre des initiatives et travailler de façon plus autonome. Les systèmes d'éducation et

de formation doivent donc désormais permettre l'acquisition de compétences plus larges et plus approfondies dans des domaines variés, celles-ci étant enrichies par l'expérience professionnelle. Cette évolution conduit à faire émerger la notion de dynamique de compétences, de plus en plus transversales et transférables, par contraste avec le caractère figé des qualifications. Les compétences de toutes sortes joueraient un rôle majeur dans la croissance économique. Plus la population est formée, plus la croissance économique peut s'appuyer sur des emplois qualifiés, *a priori* stables et compétitifs.

État des lieux de la formation professionnelle en France

Les niveaux de formation ont considérablement augmenté au cours des 30 dernières années, avec un nombre de diplômés du supérieur plus important que celui des non diplômés dans la tranche des 25-34 ans alors que c'est l'inverse pour les 55-64 ans. Les jeunes générations sont, en moyenne, beaucoup plus diplômées que celles de leurs parents. La tendance actuelle est à l'élévation générale du niveau de diplôme mais semble ralentir avec un effet palier qui paraît difficile à dépasser.

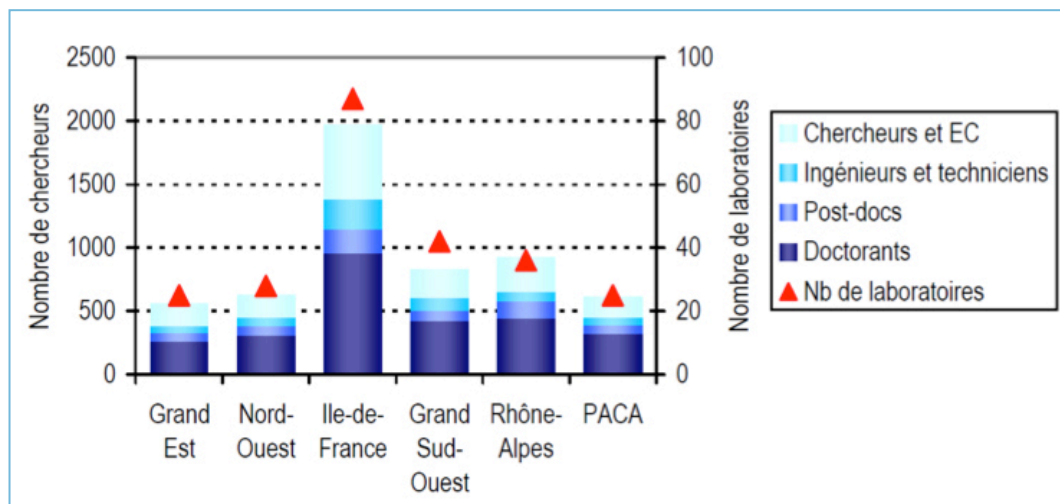
Adéquation entre offre de formation initiale et besoins des entreprises

Il existe une inadéquation partielle entre l'offre de formation et les secteurs créateurs d'emplois. De grandes disparités existent selon les secteurs considérés. Ainsi, les difficultés de recrutement sont nombreuses dans certains secteurs. Réciproquement certaines filières d'enseignement accueillent un nombre d'étudiants bien supérieur aux débouchés professionnels attendus. La multiplication des organisations de gestion prévisionnelle des emplois et des compétences vise à pallier cette inadéquation partielle.

Éducation initiale dans l'enseignement supérieur

L'organisation de l'enseignement supérieur est complexe, relevant d'organismes publics et privés. Toutefois, seul l'État peut délivrer des grades/titres universitaires et des diplômes nationaux. On distingue les universités qui allient recherche et enseignement et les écoles qui assurent des formations dans des domaines professionnels et qui sont souvent moins orientées sur des problématiques de recherche. En 2011 en France, 2 347 000 étudiants étaient inscrits dans l'enseignement supérieur, avec une augmentation annuelle moyenne de 1,1 % depuis 1999, soutenue notamment par la hausse du nombre d'étudiants étrangers.

La France compte actuellement plus de 243 laboratoires dans le domaine des nanotechnologies, dans lesquels exercent plus de 5 300 chercheurs, parmi lesquels de nombreux doctorants et post-doctorants.



Répartition géographique des chercheurs en nanotechnologies en France¹.

Les systèmes d'enseignement supérieur européens sont traversés par d'importantes réformes visant à leur harmonisation au niveau mondial. Le principal moteur de ces réformes est le choix de s'adapter à l'économie de l'innovation, dans laquelle la production et l'utilisation du savoir sont la source de la productivité économique. Le secteur émergent des nanosciences et des nanotechnologies constitue un exemple frappant de cette transformation consacrant l'université comme lieu de formation adaptée à des travailleurs de l'économie de l'innovation. L'enseignement supérieur a notamment pour rôle la formation des travailleurs de la connaissance adaptés à cette nouvelle économie. À noter que cette transformation s'effectue dans un contexte où les filières scientifiques tendent à être moins prisées par les étudiants que d'autres filières d'enseignement.

En France, la LOPR (loi d'orientation pour la recherche) promulguée en 2006 et la LRU (loi sur les libertés et responsabilités des universités) en 2007 ont été les principales réformes du système de recherche et d'enseignement supérieur. Elles ont marqué l'avènement d'universités désormais conçues sur le modèle de l'entreprise : en compétition pour le prestige et les financements, elles sont forcées de se développer sur le modèle entrepreneurial, développant des stratégies pour rester ou devenir compétitives sur le marché mondial de l'enseignement supérieur. La nécessité de devenir ou de rester rentables a conduit les universités à resserrer leurs liens avec le privé, notamment dans les secteurs stratégiques comme les nanotechnologies. Cela conduit souvent à des regroupements universités-entreprises au sein de grands pôles de compétitivité ou clusters.

Dans ce contexte, il est intéressant de constater que le secteur des nanosciences et des nanotechnologies, du fait de sa nouveauté et de son ancrage très fort dans le secteur privé, offre un exemple éclairant de ces évolutions.

Dans le domaine de la nanoélectronique par exemple, de grands groupes de la micro-électronique sont étroitement associés au développement de la recherche et de l'enseignement public des nanomatériaux dans leur secteur :

¹ http://cache.media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/Plan_Nano_innov/32/0/Fiche_recherche_nanos_52320.pdf

- le financement des plateformes de recherche et d'enseignement des nanosciences et nanotechnologies : les industriels ont intérêt à financer la recherche dans ce domaine et à former des étudiants sur leur propre matériel, constituant ainsi une réserve de main d'œuvre qualifiée dans ce domaine ;
- la participation des industriels à la constitution des maquettes d'enseignement des nouvelles formations en nanosciences et nanotechnologies, ainsi que leur présence dans les conseils d'orientation de ces formations ; ceci illustre le renforcement des relations entre universités et industriels dans un contexte de réforme de l'enseignement supérieur et de la recherche, amenant une culture de l'évaluation fondée en grande partie sur la rentabilité des formations et leurs débouchés professionnels dans l'industrie.

Durant la dernière décennie, on a vu émerger des projets de réseaux à forte composante recherche et formation dédiée aux nanomatériaux. Parmi ces réseaux, on peut citer :

- les réseaux nationaux : réseau Nanomat, Club Nano-Micro-Technologies, CNFM (Coordination nationale de la formation en microélectronique et en nanotechnologies),
- les réseaux européens ERANET Nano-Sci-ERA,
- les pôles de compétitivité qui intègrent un volet recherche et formation,
- les réseaux régionaux et interrégionaux : CNRT matériaux, réseau C'Nano.

Les nouvelles formations en nanosciences et nanotechnologies qui ont fleuri ces dernières années, principalement au niveau master sont particulièrement adaptées à la constitution d'une main d'œuvre correspondant aux besoins du marché international du travail, dans le contexte de globalisation actuel. Ces masters sont très souvent internationaux et les programmes d'enseignement laissent une large part à l'acquisition de compétences directement issues et à destination du secteur privé. Actuellement, on recense plus d'une quinzaine de masters en nanosciences.

L'émergence des cursus de nanosciences et nanotechnologies à l'université n'est pas seulement due à l'avancée de la recherche fondamentale dans ce domaine, ni encore moins le résultat d'un choix sociétal. Elle provient surtout des promesses économiques des applications attendues de la « révolution nano ».

Dans un contexte de course à la productivité au sein d'une économie de l'innovation, les entreprises ont des besoins énormes en R&D, d'autant plus dans un secteur émergent comme celui des nanosciences et des nanotechnologies. Elles tendent ainsi à s'associer de plus en plus étroitement aux systèmes publics de recherche et d'enseignement pour mutualiser leurs recherches, leurs dépenses de R&D et pour former des spécialistes adaptés à leurs domaines de recherche.

Un exemple

Pour répondre aux besoins des entreprises de la micro et de la nanoélectronique, la coordination nationale de formation en micro et nanoélectronique (CNFM) a été créée. En effet, le développement des entreprises de la micro et de la nanoélectronique nécessite une formation pratique d'excellence pour les étudiants de ces filières. Les équipements associés à ces formations sont souvent onéreux tant en termes d'investissement que de fonctionnement. C'est pourquoi il est nécessaire d'assurer une mutualisation nationale de

ces moyens. Ce constat a conduit à la création d'un GIP (groupement d'intérêt public), le CNFM, composé de douze pôles. Ces pôles, centres interuniversitaires régionaux ou interrégionaux, regroupent des équipements de fabrication et de caractérisation, du matériel informatique et des logiciels pour la conception assistée par ordinateur et le test des circuits et systèmes intégrés, ainsi que pour le prototypage.

Cependant, il faut signaler que les centrales de proximité réalisent également des actions de formation pratique pour les universités et certaines PME locales. Par ailleurs, elles ont élargi leur offre à d'autres secteurs que celui l'électronique notamment à la physique et à la chimie. Il est donc nécessaire d'optimiser au mieux, au niveau national, l'ensemble de ce dispositif et de clarifier les objectifs de chacune des structures.

Le projet Euro Training financé par l'Union européenne vise à apporter une formation de haute qualité dans le domaine des nanotechnologies pour favoriser la compétitivité sur le marché mondial des entreprises. Cette initiative met les nanotechnologies à l'honneur à travers une offre de formations innovantes s'adressant aux acteurs industriels, chercheurs et étudiants.

Lancé en janvier 2013, Euro Training se matérialise par une plateforme en ligne, qui propose un large choix de formations avancées, cours d'été, documents téléchargeable, vidéos... Il est destiné aux ingénieurs de l'industrie, chercheurs ou enseignants en université. La plateforme fonctionne d'abord comme un espace de diffusion et de communication qui recense les cours spécialisés proposés par les universités européennes partenaires et les événements importants du secteur des nanotechnologies.

Ce projet répond à un besoin réel des entreprises. La grande mission du projet est également de former les ingénieurs des entreprises afin d'optimiser leur compétitivité.

L'offre de formation continue vis-à-vis de ces nouvelles technologies demeure pour l'heure relativement pauvre. Généralement, les fournisseurs d'équipements dédiés aux nanomatériaux délivrent une formation aux futurs utilisateurs. Quelques organismes proposent des formations continues, y compris certifiantes, destinées à la mise à jour des connaissances ou l'initiation à des sciences et techniques nouvelles. Parmi ces organismes, on peut notamment citer l'INSTN (Institut national des sciences et techniques nucléaires), le SERFA (Organisme de formation professionnelle continue en Alsace) ou le CIME (Centre interuniversitaire de microélectronique et nanotechnologies). Il convient également de citer les formations continues visant à acquérir des connaissances sur les nanomatériaux en vue d'engager une démarche de prévention des risques. C'est le cas notamment des formations proposées par l'INRS.

Prospective

Le système éducatif français doit faire face à des enjeux de différentes natures pour demeurer performant.

Le développement des entreprises dans le domaine des nanomatériaux repose sur des évolutions technologiques majeures et rapides : une formation pratique d'excellence des jeunes ingénieurs est un facteur déterminant pour la réussite de ces entreprises.

L'interdisciplinarité offre un grand intérêt pour les nanosciences et les nanotechnologies, mais les systèmes d'éducation et de formation traditionnels n'y préparent pas. Les nouveaux produits, les nouveaux services et les nouvelles méthodes de production entraîneront une demande de métiers inédits. Il est donc nécessaire d'encourager la formation initiale et continue interdisciplinaire pour répondre aux défis de ces nouvelles technologies et l'enseignement dans la R&D sur les nanosciences et nanotechnologies en mettant l'accent sur la physique, la chimie, la biologie, la toxicologie et l'écotoxicologie ainsi que sur l'ingénierie, sans oublier pour autant l'étude des retombées entrepreneuriales, l'évaluation des risques et les sciences sociales et humaines le cas échéant. Concernant la formation continue, des programmes devraient aussi être spécifiquement ciblés sur les PME qui manquent souvent de l'expertise ou des ressources internes nécessaires.

Les pouvoirs publics contribuent au développement de l'économie de la connaissance sur le territoire national et sur l'espace européen de la recherche. Dans le cas où le développement des nanosciences devient une priorité, un des enjeux sera le renforcement du partenariat entre les réseaux de recherche académique et le monde industriel dans le domaine des nanomatériaux sous la forme de projets de coopération industrie / recherche visant à accroître la compétitivité des entreprises.

Les laboratoires et les entreprises devront alors s'approprier cette approche nouvelle concernant le développement et la valorisation des nanomatériaux et être force de proposition quant aux grandes orientations de la formation pratique.

Un exemple de cette collaboration est le centre de nanosciences et de nanotechnologies qui s'installera en 2017 à Paris-Saclay. Il sera un futur pôle de référence nationale en matière de nanosciences et de nanotechnologies sur le campus de Paris-Saclay. Il sera ouvert aux acteurs académiques et industriels, afin de permettre le développement de leurs axes de recherche stratégique dans les domaines des matériaux, de la nanophotonique, de la nanoélectronique, des nanobiotechnologies et des micro-nano systèmes.

Le développement de formations spécifiques et structurées aux domaines des nanosciences apparaît nécessaire à l'émergence d'une véritable filière industrielle française dans ce domaine, tout en veillant à bien cibler les attentes des entreprises en matière de formation liée aux nanotechnologies.

De plus, étant donné la diversité des applications envisageables avec les nanomatériaux, l'intégration de modules de formation en nanosciences et nanotechnologies dans les cursus traditionnels tels que la chimie, biologie, électronique... contribuerait au développement économique de ces technologies.

Hypothèses

Hypothèse I. Dispersion des formations

On assiste à un maintien des efforts de formation, en particulier en matière de formation initiale, avec des niveaux de qualification équivalents au niveau actuel, dans un contexte d'amélioration de l'adéquation de l'offre de formation aux besoins des

secteurs d'activité. De nouvelles formations en nanosciences et nanotechnologies sont proposées dans les filières classiques, notamment via des masters spécialisés. Cette multitude de masters tend à engendrer un manque de cohérence entre les enseignements et un manque de visibilité.

La formation continue se développe de manière épisodique et est principalement assurée par les producteurs de nanomatériaux et fournisseurs d'équipements en lien avec les nanomatériaux.

En revanche, la formation à ces nouvelles technologies demeure toujours absente des programmes d'enseignement secondaire.

Hypothèse 2. Cohérence et organisation des formations initiales et continues

On assiste à une politique publique forte de développement massif de la formation dans les nanosciences avec une structuration de la formation sur les activités nanomatériaux, pour rassembler et cibler les compétences nécessaires au développement des nanomatériaux, en s'appuyant sur les réseaux de formation aussi bien initiale que continue, et de formation par la recherche ayant une reconnaissance nationale et internationale. On assiste à une mutualisation et une structuration de l'information, des moyens et des compétences sur l'ensemble des établissements français concernés par l'enseignement supérieur en nanomatériaux.

En parallèle, les liens se resserrent entre les universités et les entreprises du domaine, permettant d'élaborer un maillage interactif de formation entre les laboratoires et les établissements industriels, et de construire des formations en adéquation avec les besoins des industriels.

La mise en place de mesures de soutien financier aux projets spécifiques de recherche et formation générés par ces réseaux (bourses doctorales et post-doctorales) permet de :

- favoriser le développement des nanomatériaux en s'appuyant sur le tissu et les compétences scientifiques et industrielles existantes et en renforçant l'approche pluridisciplinaire des filières de formation initiale et continue,
- élaborer des projets de recherche appliquée et de formation au sein d'un même réseau ou en s'associant avec plusieurs réseaux et le tissu industriel.

Afin de promouvoir les filières universitaires dédiées aux nanotechnologies, des actions de formations dès l'enseignement secondaire sont également prévues, nécessitant au préalable une sensibilisation du corps enseignant à cette thématique.

Hypothèse 3. Organisation ciblée des formations

Le développement de la formation initiale en nanotechnologie et nanomatériaux s'effectue uniquement dans quelques domaines et secteurs porteurs. Ces formations spécifiques se construisent avec les acteurs industriels des secteurs identifiés.

Références

Utilisation des robots d'assistance physique à l'horizon 2030 en France.
Rapport INRS, Fiche variable Formation professionnelle.

Projet de plan nanomatériaux. 10 propositions d'actions concrètes.
DGE/SIMAP/ITVM, 2005.

www.enseignementsup-recherche.gouv.fr

Nano-Innov : un plan pour les nanotechnologies

La recherche en nanosciences et nanotechnologies en France

www.sciencescitoyennes.org

www.clubnano.asso.fr

Loi n° 2007-1199 du 10 août 2007 relative aux libertés et responsabilités des universités.

Loi de programme no 2006-450 du 18 avril 2006 pour la recherche.

Le tissu industriel

Irina Guseva-Canu, InVS

Définition

La production mondiale des nanomatériaux a été multipliée par 10 entre 2002 et 2011, passant à plus de 270 000 tonnes en 2011. Une estimation conservatrice pour 2016 est d'environ 400 000 tonnes, couvrant principalement les demandes des marchés de microélectronique, énergie, médecine, chimie, revêtement et catalyse (1). Il est attendu qu'à terme, les nanotechnologies autoriseront une diminution des dépendances technologiques et énergétiques vis-à-vis d'autres pays, notamment grâce à leur capacité de substitution pour certaines terres rares ou matières premières. A plus courte échéance, elles peuvent avoir un fort impact sur la diffusion du progrès technologique et la création d'emplois, puisqu'elles pourraient générer entre 2 et 10 millions emplois directs dans le monde et représenter environ 10 % de l'emploi manufacturier en Europe à l'échéance de 2015 (1). Les montants investis actuellement dans le monde sont de plusieurs centaines de milliards de dollars. Toutefois, l'impact sur les emplois et les territoires est très difficile à évaluer. En se basant sur différentes analyses (montant investis en R&D, analyses de marché, part relative entre pays...), l'impact potentiel peut être estimé de l'ordre de plus de 20 % sur les emplois industriels à court et moyen termes. Toutefois, l'impact réel sur les emplois dépendra d'un ensemble de facteurs très complexes (1).

Indicateurs

1. Dynamique de croissance du nombre d'entreprises engagées dans les nanotechnologies (NT).
2. Dynamique de croissance interne (taille et structure) des entreprises engagées dans les NT.

Rétrospective

A ce jour, les NT et les nanomatériaux ne constituent ni un secteur, ni une branche au sens de la comptabilité nationale. Ils échappent aux statistiques du commerce extérieur et ne sont représentés dans aucune nomenclature d'activité et de produit française, européenne ou internationale (2). Le recensement le plus exhaustif des entreprises françaises productrices ou importatrices des nanomatériaux (quantité > 100 grammes par an et par substance) en France est la Déclaration annuelle obligatoire des substances à l'état nanoparticulaire, R-nano (3). D'après cette source, le nombre d'entités (entreprise ou ses établissements-filiales) françaises ayant soumis au moins une déclaration au 1^{er} juillet 2013 est de 670 (3). Les données publiées ne permettent pas de connaître la taille des entreprises ni d'appréhender leur structure organisationnelle. Dans l'hypothèse où les entreprises des NT auraient la même taille que dans d'autres secteurs, 90 % des entreprises françaises des NT seraient des PME¹.

En 2011, la DGCIS² a réalisé une enquête auprès de 300 entreprises (4). Dans cette enquête, l'industrie des nanomatériaux a été appréhendée en tant qu'un sous-ensemble de la filière en France. L'enquête s'est intéressée davantage aux producteurs des nanomatériaux ; par conséquent, ses résultats ne sont pas représentatifs de l'ensemble du tissu industriel des NT (4). D'après cette enquête, environ 60 % des entreprises sont des PME, près d'un quart sont des microentreprises, 15 % des filiales de groupes étrangers et 18 % des filiales de grands groupes français tel que l'Oréal, Michelin, Sanofi Aventis, Veolia Environnement, Sagem, etc. (figure 1). Le tiers des entreprises des NT a été créé après 2000 (4).

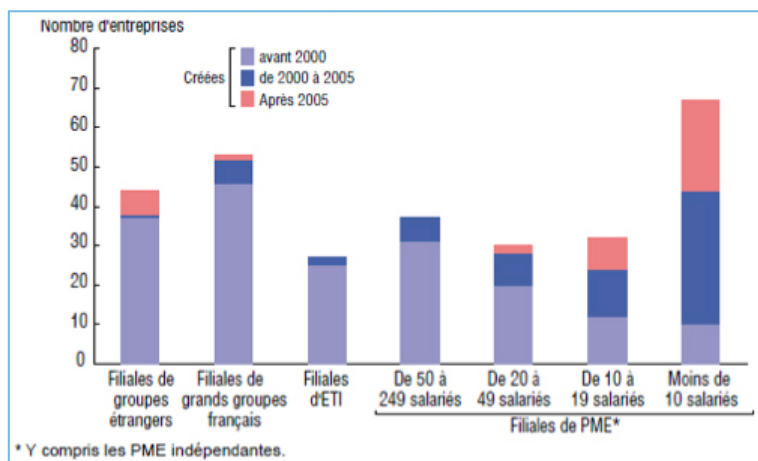


Figure 1. Répartition des entreprises selon leur taille et leur date de création.

Source : DGCIS, enquête juin 2011

Environ 15 % des entreprises de NT en constituent le noyau dur, ayant des activités à différentes étapes de la chaîne de valeur et dans plusieurs domaines de NT, y investissant une grande part de leur budget R&D, de leurs effectifs ou retirant de ces activités un chiffre d'affaire significatif. La plupart ont moins de 50 salariés et presque toutes ont été créées après 2000. Entre 1999 et 2005 ont été créés le Réseau de recherche en micro et nanotechnologie (RMNT), de grandes centrales de technologie pour la recherche

¹ Petites et moyennes entreprises.

² Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services.

technologique de base, les pôles de compétitivité pour faciliter le transfert technologique, puis dès 2007, trois réseaux thématiques de recherche avancée (mutualisation de très grands instruments de recherche). Cela semble avoir été bénéfique à la création de très petites entreprises (plus de 25 % créées après 2005) et à une petite dizaine d'entreprises de 10 à 20 salariés et de filiales de groupes étrangers (figure 1) (4).

Près de 20 % des entreprises engagées dans les NT bénéficiaient du statut de jeunes entreprises innovantes (JEI) en 2010, contre 16 % en 2009 et 2008. Elles représentent 2 % du total des exonérations sociales et fiscales accordées par le dispositif JEI. 60 % d'entre elles sont des prestataires de services, 40 % font de la R&D et 60 % appartiennent au pôle de compétitivité.

La taille de l'entreprise semble déterminante du degré de son implication dans les NT (figures 2 et 3). Le poids économique des NT est le plus fort ($\approx 30\%$ du chiffre d'affaire total) dans les entreprises employant entre 250 et 500 salariés (Arkema, STMicroelectronics, NXP Semi-conductors). Il est de 20 % dans les PME et ETI (entreprises de taille intermédiaire de 250 à moins de 5000 salariés) françaises, de 22 % dans des filiales des groupes étrangers implantés en France et seulement de 6 % dans des grands groupes français engagés dans les NT. Plus de la moitié des entreprises exportent des produits et des services liés à des NT contre 30 % des petites entreprises de moins de 50 salariés (4).

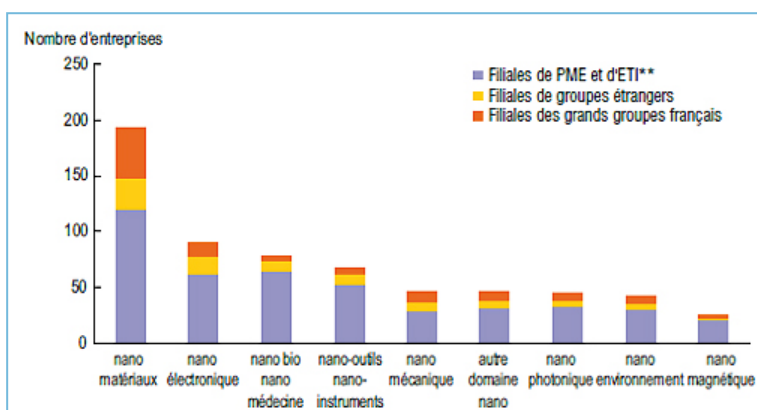


Figure 2. Répartition des entreprises selon le domaine d'activité en nanotechnologies.

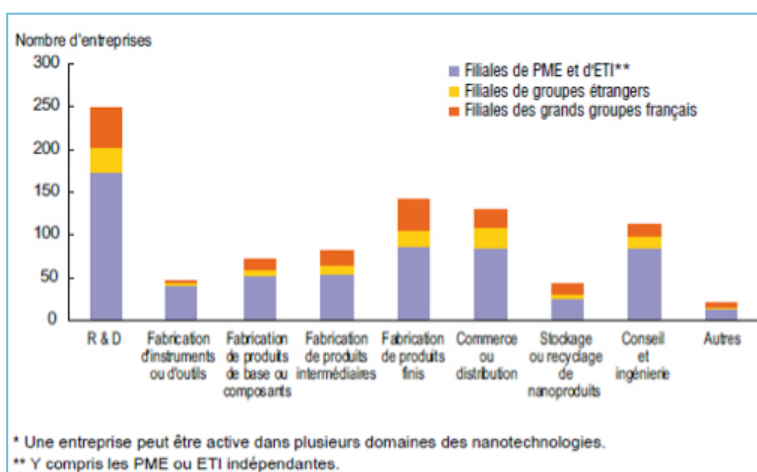


Figure 3. Répartition des entreprises selon leur activité dans la chaîne de valeur*.

Source : DGCI, enquête juin 2011

L'effort de R&D consenti pour les NT varie également selon la taille et le type d'entreprise. La moitié des entreprises y consacrent moins de 10 % de leur budget recherche, dont 90 % des filiales des grands groupes français et 50 % des filiales de groupes étrangers. A l'inverse, 15 % des entreprises y consacrent 90 % de leur budget R&D. Ce sont des petites entreprises spécialisées, de moins de 50 salariés dont le chiffre d'affaire avoisine 5 M€. À cet égard, la faiblesse des fonds propres des *start-up* constitue un facteur aggravant car ne justifiant pas de chiffre d'affaire, les *start-up* ont des difficultés à obtenir des aides significatives au démarrage. Les activités de production des nanomatériaux nécessitent également un nombre de compétences trop élevé pour être réuni au sein d'une *start-up*. Ainsi les *start-up* se développent plus, semble-t-il, autour des activités d'instrumentation.

Les PME, et principalement des *start-up*, se caractérisent par des *business models* très hétérogènes en raison notamment de leur positionnement flou dans la chaîne de valeur allant de la R&D pure à la fabrication, au recyclage, au conseil et à l'ingénierie (4).

En ce qui concerne la capacité à convertir les résultats de recherche en produits et en valeur, la France est en deuxième position en Europe. Les 2/3 des brevets européens dans le secteur sont détenus par l'Allemagne. Les déposants sont principalement des industriels à la hauteur de 70 % et plus particulièrement des entreprises multinationales (4).

Malgré un positionnement honorable au début des années 2000, et un réel investissement de la recherche publique et privée, la France a pris du retard sur ses principaux partenaires dans le déploiement industriel des nanotechnologies et des produits et systèmes auxquels elles ouvrent la voie, du fait de certaines barrières. Ces barrières, qui sont jugées surmontables, se regroupent principalement en trois catégories (1) :

1. Le cadre réglementaire et la perception par la société des risques directs et systémiques ;
2. Une fragilité avérée dans le transfert aux échelles industrielles des avancées de la recherche ;
3. La structuration de l'écosystème de soutien face à une filière transverse (*enabling*) qui est une difficulté propre aux technologies habilitantes ou capacitantes. On constate une grande dispersion des acteurs et peu de liens entre eux. En outre le choix des spécialisations « aval » par des pôles de compétitivité ne soutient pas explicitement les technologies KETs (*Key Enabling Technologies*) dont l'aspect transverse conditionne les succès en innovation de la plupart d'entre eux. À cela s'ajoute une absence de vision cohérente des perspectives d'avenir pour ces filières industrielles en France dans la sphère État, dont l'action n'est pas organisée en synergie.

Prospective

En l'absence de données représentatives sur la structure, la taille et le mode de gouvernance des entreprises des NT en France, on fait l'hypothèse d'une similitude entre les entreprises des NT et le reste du tissu industriel (90 % des entreprises françaises sont des PME).

Hypothèses

Hypothèse 1

Dynamique positive de création des entreprises innovantes, stimulée par des grands donneurs d'ordre, voire des subventions d'État, puis une autonomie croissante et la création des lignes de production et d'emplois.

Hypothèse 2

Seules des entreprises de certains pôles de compétitivité s'en sortent grâce au soutien financier des structures existantes. La situation est aggravée par une crainte et un rejet des NT par les consommateurs, les produits des NT restent chers et ne trouvent pas de marché. Les entreprises désinvestissent et « recyclent » les moyens et les emplois initialement consacrés aux NT et/ou délocalisent la production.

Hypothèse 3

Un ou deux secteurs le(s) plus robuste(s) tel(s) que la micro-nanoélectronique ou la défense se développent et permettent la création de nouvelles entreprises et / ou d'emplois. Progressivement, ils deviennent exemplaires et rentables. Le développement des services liés aux NT se maintient. Certains de ces services sont spécifiques et très demandés, ils permettent de donner une position de notoriété à la France.

Références

- (1) Rapport de la commission interministérielle N°2013/11/CGE/SG. Le Déploiement industriel des nanotechnologies et de la biologie de synthèse sur les territoires, précurseur des manufactures du futur. Décembre 2013.
- (2) CEDEF-le portail de l'Économie et des Finances. Dossier documentaire Les nanotechnologies (14/02/2013). <http://www.economie.gouv.fr/cedef/dossier-documentaire-nanotechnologies>, consulté le 16/04/2014.
- (3) ANSES, Rapport d'étude « Éléments issus des déclarations des substances à l'état nanoparticulaire ». Novembre 2013, 178p.
- (4) DGCIS, Enquête juin 2011. Le 4 pages de la Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services, n°16, décembre 2011.
- (5) N.E. Sadi. Pourquoi la France n'arrive pas à percer dans la dans la course aux nanotechnologies. Usine Nouvelle n°218786, novembre 2013. www.usinenouvelle.com

L'organisation de la production

Myriam Ricaud, INRS

Définition

L'impact des nanomatériaux manufacturés sur l'économie mondiale est très prometteur. Les applications sont multiples, pour la plupart innovantes et inédites, et concernent des secteurs d'activité extrêmement variés qu'ils soient traditionnels ou émergents. À l'horizon 2015, 15 % de l'activité manufacturière mondiale serait concernée par des produits utilisant des avancées issues des nanotechnologies et des nanomatériaux¹.

Entre 2002 et 2011, selon un rapport de Market publishers², la production mondiale de nanomatériaux manufacturés a été multipliée par dix atteignant approximativement 230 000 tonnes en 2011³. Cette production pourrait atteindre plus de 350 000 tonnes en 2016, avec notamment des débouchés industriels nombreux dans les secteurs de la chimie, de la médecine, de l'électronique et de l'énergie. Il y aurait, selon ce même rapport, plus de 400 entreprises productrices de nanomatériaux dans le monde.

Les principaux pays producteurs de nanomatériaux manufacturés se situent en Amérique du Nord, en Europe de l'Ouest et en Asie.

Rétrospective

Lors d'une conférence organisée en Californie en 1959, le physicien Richard Feynman a déclaré que les principes de la physique autorisaient la manipulation et le positionnement contrôlé des atomes et des molécules, individuellement, à la manière de briques de

¹ <http://www.economie.gouv.fr/cedef/dossier-documentaire-nanotechnologies>

² The global market for nanomaterials 2002-2016 : production volumes, revenues and end user market demand, Market publishers, avril 2012.

³ Il convient de souligner la très grande variabilité des données en fonction des sources consultées.

construction type Lego®. Par cette déclaration, le physicien américain suggérait à la communauté scientifique d'explorer l'univers de l'infiniment petit.

Le terme « nanotechnologie » fut utilisé pour la première fois en 1974. Dans les années 1980 avec la découverte par deux physiciens allemands d'IBM du microscope à effet tunnel, puis celle du microscope à force atomique, le nanomonde s'ouvre réellement aux chercheurs puis aux industriels. D'abord aux États-Unis, en Europe de l'Ouest et au Japon puis, au début des années 2000, en Chine, en Corée du Sud, à Taiwan, etc.

Les nanomatériaux manufacturés sont alors développés puis produits principalement par l'industrie chimique (ainsi que dans une moindre mesure par l'industrie pharmaceutique).

Dans ce secteur figurent de grands groupes industriels d'envergure mondiale tels que Dow Chemical, Exxon Mobil, Lyondell Basell et DuPont (États-Unis), BASF, Evonik Industries et Bayer (Allemagne), Shell (Pays-Bas), AkzoNobel, Solvay (Belgique), Arkema et Saint-Gobain (France), Mitsubishi Chemicals et Toray Industries (Japon), Sinopec (Chine), etc., mais également une multitude de petites structures (*start-up*, *spin-off*, PME⁴ et TPE⁵).

La production des nanomatériaux manufacturés représente l'une des voies de développement et de compétitivité majeure des industriels de la chimie dans le monde. Une compétition internationale forte est engagée depuis approximativement une vingtaine d'années.

Les industriels consacrent ainsi une part importante de leur budget à la recherche et à l'innovation. Ils ont également tendance à accroître au fil des années leurs capacités de production, et ce afin de diminuer le coût de fabrication des nanomatériaux manufacturés et donc de développer certains marchés existants ou d'en créer de nouveaux. La demande en nanomatériaux devrait ainsi atteindre 5,5 milliards de dollars en 2016⁶, les entreprises les plus innovantes devant conquérir davantage de marchés.

Les principaux nanomatériaux manufacturés produits depuis une quinzaine d'années à l'échelle industrielle à travers le monde sont ceux pour lesquels les procédés de fabrication sont anciens et donc matures tels que le dioxyde de titane, le noir de carbone, la silice amorphe, le carbonate de calcium, l'oxyde de zinc, l'alumine, les oxydes de fer et l'oxyde de cérium. Ces nanomatériaux sont généralement produits par les grands groupes industriels chimiques dans des quantités très importantes (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliers de tonnes par an). Les *start-up*, les PME et TPE développent et produisent, quant à elles, des nanomatériaux plutôt à façon, destinés à des marchés plus confidentiels tels que les fullerènes, les quantum dots ou les dendrimères.

Les États-Unis demeurent l'un des principaux pays producteurs de nanomatériaux manufacturés dans le monde. Leur production est dopée par un soutien financier considérable, notamment public, alloué à la recherche et au développement et en constante progression depuis plus d'une vingtaine d'années ainsi qu'un transfert technologique structuré. Ils disposent de grands groupes chimiques et pharmaceutiques d'envergure internationale mais également d'un tissu de *start-up* et de *spin-off* issues pour la plupart des universités et des instituts de recherche ainsi que de PME et TPE plus traditionnelles. La production canadienne demeure, quant à elle, bien en deçà.

⁴ Petites et moyennes entreprises

⁵ Très petites entreprises

⁶ <http://www.economie.gouv.fr/cedef/dossier-documentaire-nanotechnologies>

En Europe, les principaux pays producteurs sont, par ordre décroissant, l'Allemagne qui dispose d'une industrie chimique toujours dynamique, le Royaume-Uni puis la France (80 % des producteurs français de nanomatériaux sont des PME⁷). La Suisse, l'Italie et la Belgique font également partie des acteurs européens dans ce domaine.

En Asie, le Japon, la Corée du Sud et la Chine se distinguent. Le Japon demeure l'un des pays les plus impliqués dans le développement et la production des nanomatériaux, avec un financement public très important consacré à la recherche depuis de très nombreuses années. Alors que ce n'est qu'à la fin des années 1980 que le monde universitaire chinois a commencé à s'intéresser au concept des nanotechnologies, sans trouver un réel écho à l'échelon national. Jusqu'à la fin des années 1990, les médias chinois n'ont pratiquement fait aucune mention du concept et de son potentiel. La prise de conscience de l'État est due à la portée scientifique et technologique que représentent les nanotechnologies, et principalement les nanomatériaux en Chine. La Chine rivalise depuis avec les États-Unis dans la course pour devenir une grande puissance dans le domaine de la production des nanomatériaux.

Prospective

Compte tenu du coût plus élevé de la main d'œuvre, d'une réglementation souvent perçue comme davantage contraignante, de la nécessité d'importer la plupart des matières premières et d'une image plutôt dépréciée des nanomatériaux et de la chimie en général dans la société, certaines entreprises, notamment européennes, choisissent de délocaliser leur production (en partie ou totalement) en Asie, et notamment en Chine. C'est le cas, par exemple, du groupe chimique français Arkema qui a récemment investi massivement en Chine (Changshu est devenu le premier site industriel du groupe dans le monde).

D'autres, comme l'entreprise allemande Bayer, qui comptait depuis quelques années parmi les poids lourds de la fabrication de nanotubes de carbone dans le monde, a décidé d'arrêter en 2013 cette activité (et de fermer par conséquent l'une de ses usines en Allemagne) pour se recentrer sur ses produits disposant de marchés plus dynamiques.

Malgré un contexte difficile, l'industrie chimique européenne (notamment allemande, anglaise et française) devrait enregistrer une légère croissance en 2014. Elle a, par ailleurs, bien pris conscience de l'enjeu stratégique et économique que représentent les nanotechnologies et les nanomatériaux notamment dans l'objectif de conserver un positionnement phare dans la mise au point de matériaux et produits innovants et performants.

Fort d'une recherche publique structurée et bien soutenue financièrement, d'un transfert technologique efficace et effectif, d'entreprises engagées dans l'innovation depuis de nombreuses années, les États-Unis devraient asseoir dans les prochaines années leur

⁷ Les réalités industrielles dans le domaine des nanomatériaux en France. Analyse de la réalité du poids des nanomatériaux dans la filière industrielle concernée, Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services, juin 2012

suprématie dans le domaine du développement et de la production des nanomatériaux manufacturés. Talonnés de près par la Chine, où l'essor très rapide des nanotechnologies et des nanomatériaux est dû en grande partie à l'intervention du gouvernement central.

Hypothèses

Hypothèse 1. Limitation drastique de la production de nanomatériaux en France

Compte tenu d'une réglementation perçue comme de plus en plus contraignante par les producteurs et d'une image fortement dépréciée de la chimie (et par conséquent des nanomatériaux manufacturés) dans la société, les entreprises françaises limitent drastiquement leur production de nanomatériaux manufacturés. Le principal de la production est réalisé dans des pays où le coût de la main d'œuvre demeure plus faible et la réglementation moins dense, notamment en Asie.

Hypothèse 2. Accroissement de la production de nanomatériaux en France

Les nanomatériaux manufacturés sont un des domaines d'excellence des pays développés et notamment de la France. Les investissements privés mais également publics sont abondants, propices à une innovation ambitieuse. Les entreprises françaises disposent par ailleurs d'une réelle capacité de réaction grâce à un savoir-faire acquis et maîtrisé depuis de nombreuses années. La production française s'ouvre à tous les secteurs d'activité.

Hypothèse 3. Production de quelques nanomatériaux à forte valeur ajoutée en France

Disposant d'une main d'œuvre onéreuse mais néanmoins qualifiée et d'équipements pointus, l'industrie chimique française se spécialise dans le développement et la fabrication de nanomatériaux manufacturés à façon, à forte valeur ajoutée et destinés à des marchés stratégiques. La production à très grande échelle des nanomatériaux manufacturés dits anciens, moins rentables mais nécessitant également moins d'investissements, se concentre, quant à elle, en Asie.

La volonté politique française et européenne

Nathalie Thieriet, Anses

Définition

Cette fiche traite de l'implication et de la volonté politique française et européenne concernant le développement des nanotechnologies et plus particulièrement des nanomatériaux manufacturés.

Rétrospective

Le soutien et la volonté politique d'une nation pour développer un sujet économique clé peut se traduire sous diverses formes. Il peut s'agir de définir les missions et les moyens des organismes nationaux traitant du sujet pour fédérer les efforts de développement, de réunir les preneurs de décisions (industries, autorités, ONG...) pour favoriser le développement du sujet, de mettre en place des stratégies financières pour financer la recherche et le développement du sujet (mise en place de plans nationaux, définition de budgets spécifiques pour des thématiques de recherche précises...), etc.

Ainsi, c'est une volonté politique qui fait exister les nanotechnologies et les nanomatériaux manufacturés en permettant de dégager les crédits, les moyens et les structures de recherches adaptés sur le plan international et national¹.

En 2000, sous l'impulsion de Bill Clinton, les États-Unis lance la *National Nanotechnology Initiative* (NNI) avec la volonté de faire des nanotechnologies la prochaine révolution industrielle : après la conquête de l'espace, on passe à l'avènement de l'infiniment petit. Le programme du NNI est financé depuis sa création à hauteur d'environ 15 milliards de

¹ Laurent B. Les politiques des nanotechnologies: pour un traitement démocratique d'une science émergente. Éditions Charles Léopold Mayer edn. ECLM, Paris, 2010, 248 p.

dollars. La NNI réunit les 25 grands départements nationaux des États-Unis (éducation, défense, science et technologie, santé, alimentation...), les instituts techniques et scientifiques (MIT, NIST, NIOSH...) via leur ministère de tutelle et divers établissements publics et privés. La NNI rapporte directement au Président des États-Unis². Elle est en charge de rassembler des financements et de proposer des appels à projets interdisciplinaires afin de transformer l'organisation et les pratiques industrielles, modifier la société en conséquence et accroître la productivité. Pour cela, elle s'appuie sur l'élaboration de feuilles de routes (*roadmaps*). À titre d'exemple, l'investissement fédéral est typiquement de 2 milliards par an (1,8 milliard en 2010).

Un peu plus tard, en 2004, l'Europe lance un plan d'action stratégique *Towards a European Strategy for Nanotechnology*³ voulant faire de l'Europe une « société de la connaissance » en faveur des nanotechnologies. Les différents programmes cadres de recherche et développement (PCRD) successifs qui organisent les appels à projets de recherche feront la part belle aux nanotechnologies. Ils concernent non seulement le contenu des études à développer mais également l'organisation même de la recherche. C'est ainsi que différents programmes européens tels que *NanoImpactNet*⁴ ou *NanoSafety Cluster*⁵ ont pu voir le jour et ont permis de nourrir les prochains PCRD. Dans le cadre du 7^{ème} PCRD, les nanotechnologies et nanomatériaux se sont trouvés dans le programme Nanotechnologies, matériaux, procédés (NMP). En 2008, les efforts de recherche européens représentent près de 2 milliards de dollars. Pour 2010-2015, le NanoAction Plan 2010-2015 marque une évolution vers l'innovation et vers l'aval avec une prise en compte plus précise des attentes sociétales. L'Europe souhaite assurer la sécurité sanitaire des nanomatériaux selon une démarche de transparence et de dialogue avec les parties prenantes. Ainsi la Direction générale de la santé de la consommation (DG Sanco) organise sur la période 2007-2011 quatre réunions annuelles *Nano Safety for Success Dialogue*⁶ pour discuter de la sûreté sanitaire des nanomatériaux.

En France, l'organisation autour des nanotechnologies est plus dispersée. La prise de conscience politique a lieu en 2003 via la microélectronique puis la nanomédecine. Elle donnera lieu par la suite à la création d'un réseau micro et nanotechnologies, qui offre des financements publics pour des projets collaboratifs. Lors de la création de l'Agence nationale de la recherche (ANR) en 2005, les nanotechnologies apparaissent rapidement comme une priorité et donne lieu au programme PNano lancé en 2009. Les nanotechnologies impulsent par ailleurs la mise en place de pôles de compétitivité (Minatec par exemple) ainsi que de démarches de coordination qui visent à mettre en relation des laboratoires et des centres de recherche au niveau régional. Cette organisation permet tout autant de s'appuyer sur des programmes de recherche publique que sur le développement industriel (figure 1).

² Lourtioz J-M, Lahmani M, Dupas-Haeberlin C, Hesto P. Nanosciences et nanotechnologies. Évolution ou révolution ? Belin, Paris, 2014, 416 p.

³ European Union, European Commission. Towards a European strategy for nanotechnology: Communication from the Commission. EUR-OP, Luxembourg, 2004.

⁴ <http://www.nanoimpactnet.eu/>

⁵ <http://www.nanosafetycluster.eu/>

⁶ http://ec.europa.eu/health/nanotechnology/events/ev_20110329_en.htm

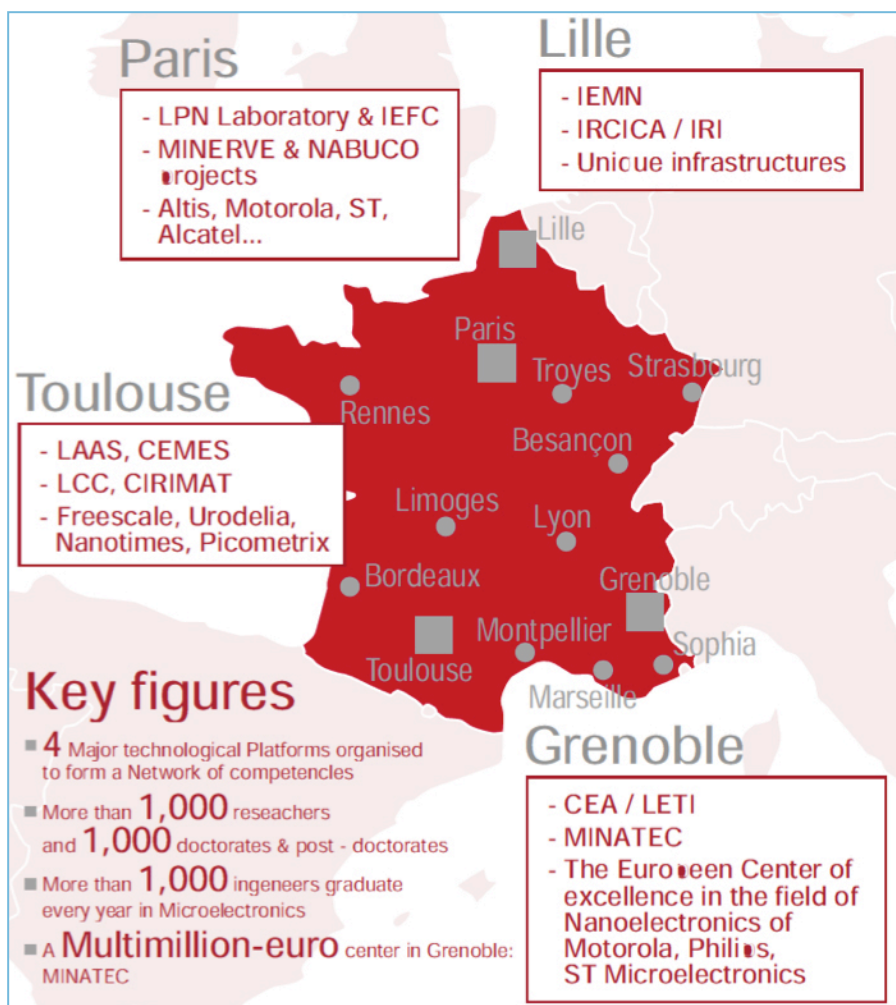


Figure 1. Réseau des plateformes françaises en nanotechnologie⁷.

D'autres mécanismes de financement de la recherche sont également possible pour favoriser le développement des nanotechnologies : les financements de la banque publique d'investissement (BPI), les budgets des différents ministères concernés mais également les intérêts du grand emprunt lancé en 2011 (Investissement d'avenir). Enfin, l'action Nanolnnov, doté d'un budget de 70 M€, a été lancée dans le cadre du plan de relance de 2009, avec pour objectif de développer trois centres d'intégration des nanotechnologies à Grenoble, Saclay et Toulouse.

La France se classe au 5^{ème} rang en termes de nombre de publications dans le domaine des nanosciences et l'effort financier public place la France au 2^{ème} rang européen derrière l'Allemagne.

En France, les questions soulevées par les applications des nanotechnologies, dont les nanomatériaux, ont fait et font encore l'objet de multiples débats publics depuis le début des années 2000⁸. Certains de ces débats ont été organisés par des institutions publiques

⁷ Bensaude-Vincent Bernadette. Nanotechnologies. Défis éthique et politique. In Programme du séminaire des invités 2012-2013, Changements institutionnels, risques et vulnérabilités sociales, master recherche de sociologie, université de Caen, 2013.

⁸ Bullich V. Du mode d'existence des nanosciences et des nanotechnologies dans l'espace public. In EHES - GSPP, 2009.

tels que le Nanoforum du Conservatoire national des arts et métiers⁹, lors du Grenelle de l'environnement (2007, atelier santé-environnement), par la Commission nationale du débat public¹⁰ ou encore par la Cité des sciences (janvier-février 2006 puis juin 2007). À ces initiatives institutionnelles s'ajoutent de nombreuses réunions publiques organisées par la société civile, par exemple : Nanomonde¹¹, Nanoviv¹², Avicenn¹³ (Sciences et Démocratie 2013).

Exemples

Tours 2015¹⁴ (lancement en mars 2012)

François Baroin, ministre de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, Laurent Wauquiez, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Éric Besson, ministre chargé de l'Industrie, de l'Énergie et de l'Économie numérique et René Ricol, commissaire général à l'Investissement annoncent un investissement de 103 millions d'euros dans le projet Tours 2015.

Ce projet de recherche et développement, qui est porté par le site de production de STMicroelectronics à Tours en lien avec le CEA et 13 laboratoires du CNRS, a été sélectionné dans le cadre du premier appel à projets Nanoélectronique du programme économie numérique. Le coût de ce projet, d'une durée de 5 ans (2012-2016), est de 164 millions d'euros, et l'aide versée par l'État au titre du soutien aux travaux de R&D est de 69 millions d'euros, dont 34 millions d'euros pour STMicroelectronics. Les investissements d'avenir financeront également la mise en place par la recherche publique d'une installation pilote, d'un coût de 34 millions d'euros sur le site même de l'industriel, partagée entre les partenaires et destinée à l'étude et à la réalisation des micro-batteries.

Ce programme vise à l'étude et au développement de composants nouveaux destinés à la maîtrise avancée de l'énergie dans les dispositifs électroniques. Il porte en particulier sur :

- des composants innovants pour la conversion de l'énergie utilisant de nouveaux matériaux semi-conducteurs ;
- des composants passifs aux performances accrues et à très faibles pertes grâce à l'emploi de nouveaux matériaux isolants ;
- l'intégration de micro-batteries et de circuits de récupération de l'énergie dans les composants électroniques.

⁹ Cnam. En ligne : <http://securite-sanitaire.cnam.fr/nanoforum/le-nanoforum-2007-2009-577215.kjsp>

¹⁰ CNDP. En ligne : <http://cpdp.debatpublic.fr/cpdp-nano/>

¹¹ Fondation Sciences citoyennes Nanodéfis pour l'énergie : quels développements durables et équitables ? In Cafés du vivant (cycle de conférences), 03/08/2006. Paris.

¹² Vivagora Nanobiotechnologies : quelles responsabilités ? quelles finalités ? In Cycle Nanoviv, 12/11/2006. Grenoble.

¹³ Sciences et Démocratie. Les citoyens face aux nanotechnologies : quels défis ? In Débats de société sur les enjeux des technologies et des sciences, 05/18/2013, Paris.

¹⁴ Tours 2015 porté par STMicroelectronics, lauréat du premier appel à projets Nanoélectronique. 22/03/2012. En ligne : <http://investissement-avenir.gouvernement.fr/content/tours-2015-port%C3%A9-par-stmicroelectronics-laur%C3%A9-du-premier-appel-%C3%A0-projets-%C2%AB-nano%C3%A9lectronique->

Les technologies développées dans le cadre de Tours 2015 présentent de nombreuses applications. Elles seront ainsi source d'innovation pour les acteurs de filières industrielles variées : habitat, automobile, transports, énergie, médical, applications industrielles ou encore biens de consommation.

Il devrait également renforcer l'écosystème constitué entre l'industrie des composants et les laboratoires de recherche dans un partenariat public-privé renouvelé, et déboucher à terme sur un renforcement de la compétitivité et l'accroissement de la production industrielle sur les territoires. Il s'inscrit dans la dynamique nationale d'innovation dans le domaine stratégique de la nanoélectronique.

Nano 2017

Plus récemment, la région Rhône-Alpes a acté son engagement au programme Nano 2017¹⁵, présenté en juillet 2013 par Jean-Marc Ayrault, en lui accordant une enveloppe de 25 M€. Nano 2017, qui s'inscrit dans la suite logique du programme Nano 2012 (2,3 Md€), vise à accompagner STMicroelectronics dans l'accomplissement d'un saut technologique, tout en augmentant sa capacité de production sur son site de Crolles, et à faire de cette région l'une des trois premières du programme de recherche européen Horizon 2020. Au total 3,5 Md€ seront investis, dont 400 M€ par l'Europe, 600 M€ par l'État et 100 M€ par les collectivités locales.

L'usine STMicroelectronics de Crolles est l'une des plus avancées d'un point de vue technologique en Europe, capable de gravure inférieure à 0,22 nm. A terme, ce site sera doté d'une capacité de production de 7 000 galettes de silicium par semaine, contre 3 500 actuellement.

Dans un communiqué, le groupe industriel franco-italien indique que ce plan devrait également lui permettre de mettre l'accent sur le développement de technologies avancées, comme le FD-SOI (*Fully Depleted-Silicon on Insulator*, une technologie qui permet d'atteindre des niveaux de consommation énergétiques faibles sans perte côté performance), l'imagerie de prochaine génération (traitement de l'image, capteurs) et enfin la mémoire non volatile embarquée (eNVM).

Nano 2017 vient ainsi succéder au précédent plan Nano 2012, amorcé en 2008. Doté d'un financement R&D de 2,3 Md€ (dont 457 millions d'euros par l'État), l'ancien plan Nano 2012 avait également pour ambition de développer le dynamisme technologique des semi-conducteurs de la région grenobloise, en soutenant les développements de STMicroelectronics, du CEA Leti, et de centres de recherche d'IBM. Il portait à l'époque sur les technologies CMOS (22 et 32 mn) et des systèmes dérivés sur puce.

Le projet Nano 2017¹⁶ permettra au pôle de Grenoble-Crolles d'être l'un des trois piliers du programme européen de recherche Horizon 2020 annoncé par la Commission européenne, qui vise à organiser une véritable filière européenne de la micro-nano-électronique. En mai dernier, dans le cadre d'un vaste projet de financement européen de 5 Md€ de l'industrie des semi-conducteurs, Neelie Kroes, la vice-président de la Commission, avait en effet identifié le site de Crolles comme l'un des pôles de R&D

¹⁵ La Région accorde 25 millions d'euros au programme Nano 2017. Publié le 30/10/2013. <http://www.info-economique.com/actualite/la-region-accorde-25-millions-d-euros-au-programme-nano-2017-84424>

¹⁶ <http://www.lemagit.fr/economie/business/constructeurs/2013/07/23/nano-2017-un-programme-de-35-mde-dont-600-me-publics-pour-les-semi-conducteurs-en-france>

capables de relever la fabrication des composants sur le vieux continent, aux côtés des sites de Dresde en Allemagne et d'Eindhoven-Leuven aux Pays-Bas et en Belgique.

Ce programme européen sur 7 ans devrait ainsi contribuer au financement de Nano 2017. Bruxelles entend apporter 30 % des financements, les 70 % restants étant de la responsabilité des états membres. « Le soutien public à Nano 2017 fera l'objet d'une notification à la Commission européenne et ne sera effectif qu'après l'autorisation de celle-ci », précise encore le Premier ministre français, tout en affirmant que ce vaste programme entend également soutenir l'emploi de la région.

La filière rhônalpine figure parmi les cinq premiers pôles mondiaux de la microélectronique. Elle représente 22 000 emplois autour de Grenoble et près de 34 000 en Rhône-Alpes. L'usine STMicroelectronics de Crolles compte près de 4 200 salariés et plus de 1 000 personnes en sous-traitance. Elle est l'un des principaux centres de production mondiale des circuits intégrés. Les dépenses annuelles du site avoisinent 1 Md€, dont 50 % sont effectuées en Rhône-Alpes.

Hypothèses

Hypothèse 1. Volonté politique inchangée

Cette hypothèse suppose qu'il n'y a pas de modification de l'organisation du financement de la recherche, pas de diminution drastique du budget pour les appels à projets, et que les besoins industriels sont en croissance sans bond technologique. Il n'y a pas de prise en charge spécifique par les politiques du dialogue entre parties prenantes.

Hypothèse 2. Restructuration de la volonté politique sur un secteur donné au niveau national

Cette hypothèse suppose qu'il y a modification de l'organisation du financement de la recherche, pour diverses raisons qui obligent à privilégier certains secteurs de la recherche :

- diminution du budget de la recherche
- bond technologique sur une branche spécifique (besoins industriels forts)
- découverte majeure supprimant tout un pan de la recherche actuelle

Implication nationale dans le développement de plateformes (articulation industrie-recherche), maintien du dialogue sur le secteur donné.

Hypothèse 3. Volontés politiques régionales fortes sans volonté nationale affirmée

Investissements forts de certaines régions dans le domaine des nanomatériaux et nanotechnologies, en sollicitant notamment les financements européens, et en s'appuyant sur le tissu industriel local. Dialogue au niveau régional entre les parties prenantes.

La géopolitique

Éric Gaffet, Institut Jean Lamour

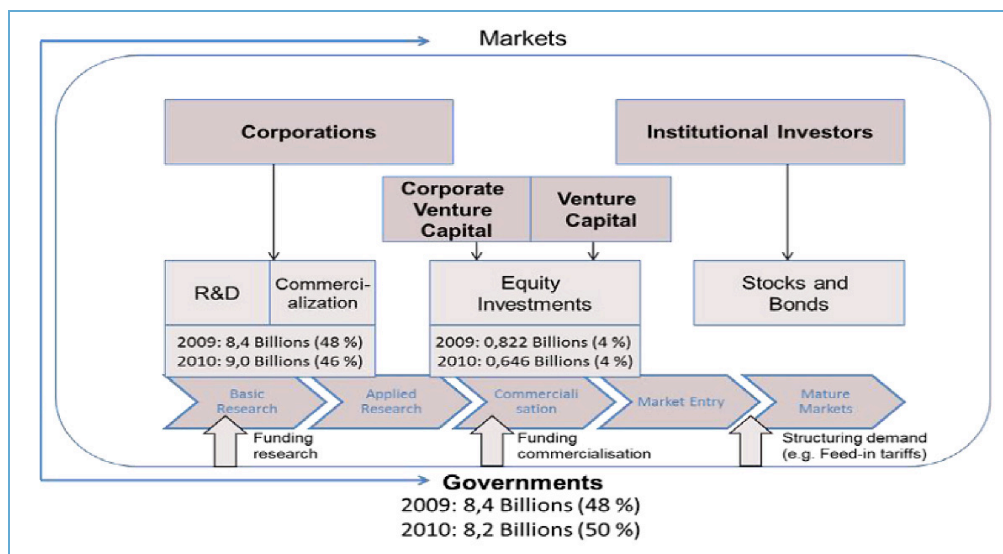
Définition

La gouvernance à l'échelle mondiale des nanotechnologies se traduit notamment par une structuration au niveau de l'OCDE avec la mise en place des *Working Party on Nanotechnology* (WPN) et *Working Party on Manufactured Nanomaterials* (WPMN) et leurs structures miroirs au niveau des différents États membres ainsi qu'au niveau normatif avec une déclinaison de la structure de l'organisation internationale de normalisation (ISO : *International Standardization Organisation*).

Le bilan en termes de soutiens financiers aux différentes actions engagées est représenté sur la figure suivante pour les années 2009 et 2010 (figure 1).

Figure 1. Comparaison des investissements publics et privés en 2009 et 2010¹.

Source : Présentation F. Roure - NanoNorma 16 Mars 2012 à Paris



¹ Source originale des données fournies par la présentation de F. Roure à Nanonorma 2012 : [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=DSTI/STP/NANO\(2012\)15&docLanguage=En](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=DSTI/STP/NANO(2012)15&docLanguage=En)

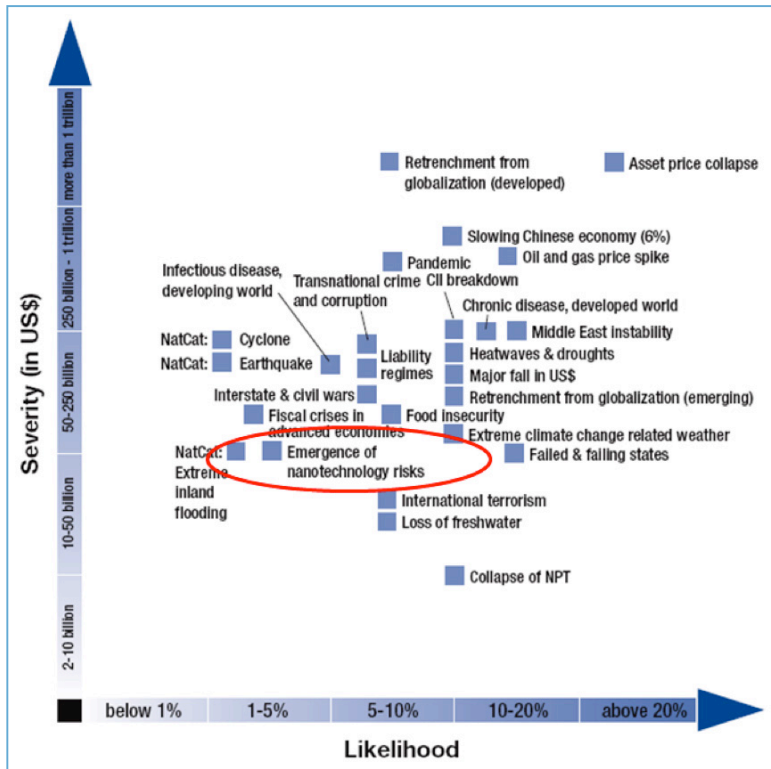


Figure 2. Les 26 risques économiques en fonction de la probabilité d'occurrence et de leur impact économique.

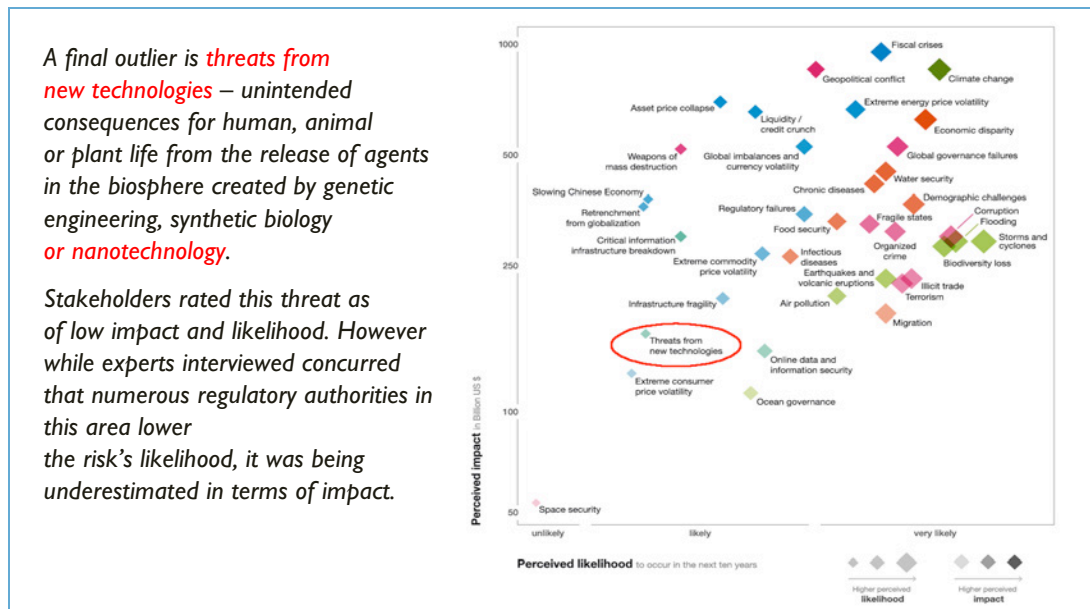
Source : World Economic Forum, Davos, 2008

Le secteur économique s'est également saisi de la question des nanotechnologies et il est intéressant de noter l'évolution sémantique concernant l'impact du développement des nanotechnologies sur les projections économiques menées dans le cadre du Forum économique mondial de Davos. En effet, si en 2008, les nanotechnologies étaient rangées dans le domaine des risques économiques parmi les 26 *Core global risks* (figure 2), en 2011, elles étaient classées parmi les menaces économiques (« *Threats from new technologies* »), au même titre que l'ingénierie génétique ou la biologie de synthèse.

Ce changement est un revirement profond tant d'une part pour la prise en compte de l'impact socio-économique du développement des nanotechnologies, que par leur « banalisation » les intégrant dans un cadre plus global de « nouvelles technologies » (figure 3).

Figure 3. Menaces sur le développement économique.

Source : World Economic Forum, Davos, 2011²



² Global Risks 2011 - Sixth Edition- An initiative of the Risk Response Network World Economic Forum in collaboration with : Marsh & McLennan Companies, Swiss Reinsurance Company, Wharton Center for Risk Management,, University of Pennsylvania, Zurich Financial Services - January 2011.

Rétrospective

Le développement des nanotechnologies, sous l'impulsion de la *National Nanotechnology Initiative* (USA) a été considéré dès le début des années 2000, par bon nombre d'États, comme un outil d'une politique visant à assurer un leadership mondial. Cette ambition et l'implication des nanotechnologies a depuis été reprise notamment par la Russie^{3,4}, l'Inde⁵, ou encore l'Iran⁶.

Sur cette base, les intentions des différents pays ont été de devenir dans un premier temps « dominants tous secteurs d'activités confondus ». Ceci est illustré par les différentes figures (figures 4 à 6) pour les années 2005 à 2008, figures adaptées de données produites par Lux Research.

³ \$36Bln Set Aside for Nanotechnology (2008)

Source: The Moscow Times - Author: Anatoly Medetsky.

<http://www.themoscowtimes.com/stories/2008/01/18/041.html>

The Russian cabinet has approved a plan to increase sales in the country's nanotechnology sector by a factor of 130 by 2015. The article says that the plan "focuses on funding research and expanding the number of companies producing new materials and equipment commercially." According to the article, Russian Prime Minister Viktor Zubkov has estimated that the government will spend US\$9.6 billion on the plan and has expressed concerns that there is a lack of ideas on how to effectively apply the funding. Svetlana-Optoelektronika, a Russian company that produces power-saving light emitting diodes for Russian Railways, said that it anticipates that energy efficiency will be one of the government's priorities in nanotechnology development. Lev Trusov of Association Aspect, a Russian company that produces nanomembranes for processing gas generated through oil production, indicated his expectation that "the government's plan would help large-scale projects in the sector take off, including in the production of biofuels." The article can be viewed online at the link below.

⁴ Russia to Invest \$10 Billion in Nanotechnology in Mid-Term (2008)

Source: Russian News and Information Agency Author: n/a (3 December 2008)

<http://en.rian.ru/russia/20081203/118663658.html>

Sergei Ivanov, Deputy Prime Minister of Russia, announced that Russia plans to invest US\$10 billion in nanotechnology development programs in the mid-term. The plan was announced today at an international nanotechnology forum being held in Moscow. Half of the funds will come from the Russian Nanotechnology Corporation, which is set to invest US\$714 million in more than 20 projects over the next three months. A statement from Russian President Dmitry Medvedev said that Russia has "...all the required conditions for a future breakthrough to create a potential dominance in the sphere of nanotechnology." The article can be viewed online at the link below.

⁵ WNEC India conference, Mumbai - 28th - 29th March, 2006

Source: <http://www.world-nano.com/india/>

The First World Nano-Economic Congress (WNEC) India represents the seventh edition of this successful event series with previous events having been held in Washington, DC, London, UK, Munich Germany, Dublin, Ireland, Singapore.

The World Nano-Economic Congress (WNEC) is the one comprehensive event that brings together the thought leaders in science, government, and business to discuss the entire value chain of nanotechnology's commercial development.

Already established as an annual event in Singapore, the WNEC now comes to one of Asia's fastest growing economies, helping delegates and exhibitors tap into India's emerging rich seam of technology talent.

With a stock market hitting record highs, an annual production of engineering graduates five times higher than the United States, and industries from textiles to automotive already taking advantage of nanotechnologies for both domestic and export markets, India is poised to be one of the 21st Century's nanotech winners.

The WNEC events have been able to bring together both comprehensive program on the varied applications of nanotechnologies within industry with world-renowned speakers. Past speakers include.

⁶ ISLAMIC STATES: Science and Technology Innovation (6 Avril 2010)

Source: University World News - Author: Wagdy Sawahel

<http://www.universityworldnews.com/article.php?story=20100403082552829>

The Committee for Scientific and Technological Cooperation of the 57 member states of the Organization of Islamic Conference (OIC) has announced the creation of a science and technology innovation organization, or STIO, which will focus on maximizing the scientific talent and technological potential of the Muslim world. The STIO will work to pool the resources of the private and public sectors for research and development. The Muslim world comprises approximately 25 percent of the world's population but its research and development manpower amounts to only 1.1 percent of the worldwide total. The recent list of the top 100 universities in the world does not include even one from an Islamic country. Ali Karami, an associate professor at the Research Center of Molecular Biology of Baqiyatallah University of Medical Science, Iran, said "ISluch regional projects for collaboration and capacity building in Islamic countries stretching from Indonesia to Morocco are crucial for strengthening R&D, not only in nanotechnology but also in biomedical technologies, emerging science and technologies." The Islamic states also approved an Iranian proposal to establish a world-class nanotechnology network to boost science and technology and strengthen research capacity.



Figure 4. Évolution des positions des différents États (2005-2006).
Source : Lux Research, 2006



Figure 5. Évolution des positions des différents États (2005-2007).
Source : Lux Research, 2007

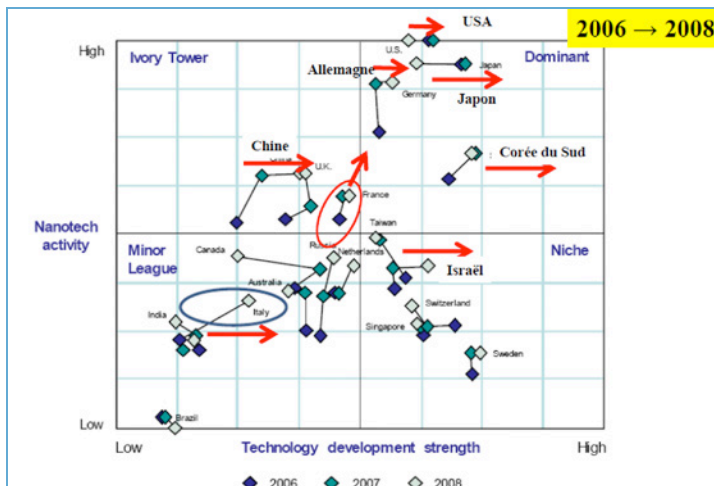


Figure 6. Évolution des positions des différents États (2006-2008).
Source : Lux Research, 2008

Alors qu'il était attendu que l'ensemble des pays impliqués dans les nanotechnologies poursuive sur cette dynamique, à savoir atteindre une position dominante au niveau

mondial, quel que soit le secteur d'activités (figure 7, projection 2012 établie dès 2008), un net revirement de stratégie est intervenu pour certains États (figure 8).

Ce revirement s'est traduit par un repositionnement se traduisant par une logique dite « tour d'ivoire » privilégiant une concentration sur certains secteurs jugés stratégiques, plutôt qu'un développement tous secteurs confondus.

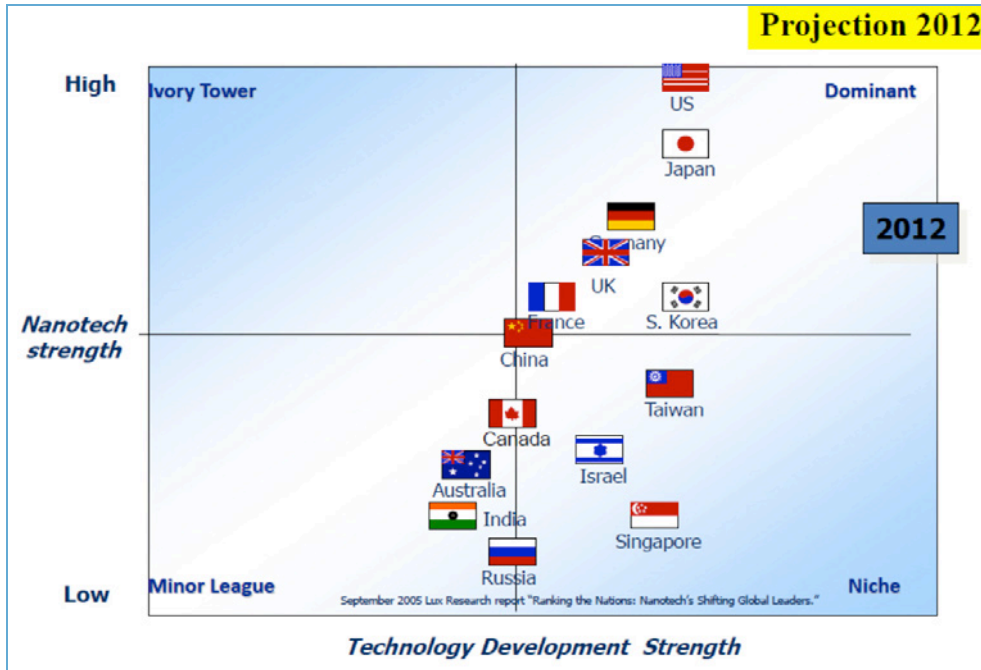


Figure 7. Projection 2012 du positionnement des États dans les domaines des nanotechnologies.

Source : Lux Research, 2005

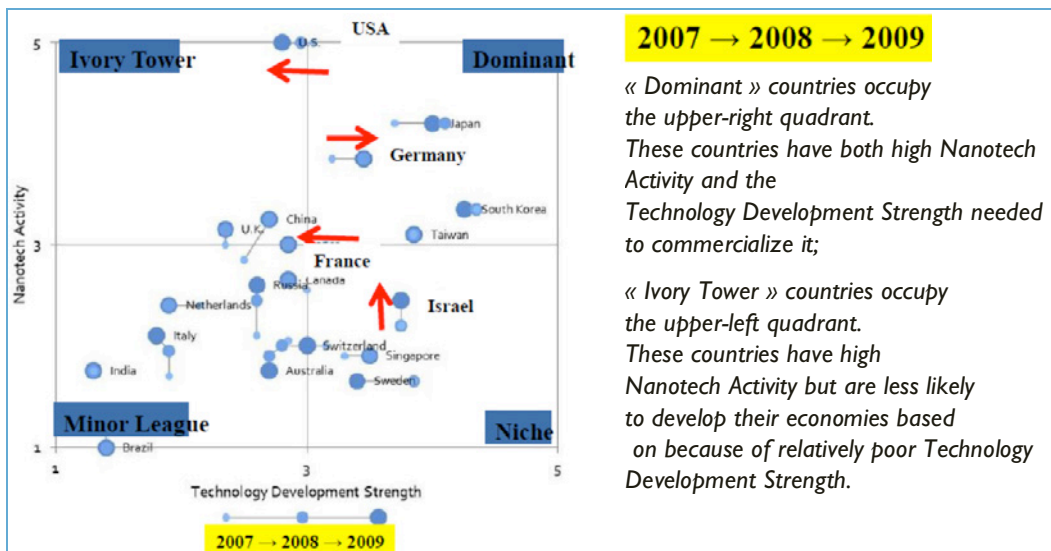


Figure 8. Évolution des positions des différents États (2007-2009) traduisant un changement de stratégie d'une logique dominant à une logique tour d'ivoire.

Source : <http://www.electroiq.com/articles/stm/2010/08/ranking-the-nations.html>, August 2010

Hypothèses

Hypothèse 1. Poursuite du développement tous secteurs confondus

Les nanomatériaux poursuivent leur développement tous secteurs confondus quel que soit le pays considéré avec peut être un ralentissement général lié à la baisse généralisée des fonds de soutiens quel que soit le pays.

Hypothèse 2. Spécialisation par les coûts

Compte tenu de l'intégration des nanomatériaux et nanotechnologies dans les cycles industriels classiques, les nanomatériaux deviennent un agent chimique comme les autres et la notion de baisse des coûts prend la priorité ainsi que la prise en compte des risques sanitaires. À ce titre, les nanomatériaux à faible valeur ajoutée sont de plus en plus produits dans les pays à bas coût. Les nanomatériaux à forte valeur ajoutée et jugés stratégiques sont concentrés sur les pays à fort coût de main d'œuvre et à haute technicité.

Hypothèse 3. Spécialisation sectorielle, choix stratégique

Des pays ou des régions investissent dans des secteurs spécifiques considérés comme stratégiques selon un processus que l'on peut qualifier de tour d'ivoire.

L'encadrement juridique

Nathalie Dedessous-Le Moustier, Université de Bretagne-Sud

Alors que les nanomatériaux font partie de notre quotidien, l'état des connaissances sur leurs effets sur la santé, notamment des salariés qui les fabriquent et les manipulent, est incomplet. Cependant, dès 2008, l'Afsset¹ (devenue Anses² depuis) recommandait de recenser les personnels travaillant au contact des nanomatériaux, de surveiller leurs conditions de travail et de renforcer les mesures de prévention des expositions en milieu professionnel. Comment le droit et particulièrement le droit du travail permet-il la prise en compte des risques liés aux nanomatériaux ?

Définition

Nous verrons qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de dispositif juridique spécifique applicable à la protection de la santé des travailleurs susceptibles d'être exposés aux nanomatériaux. Les dispositions édictées par le Code du travail pour prévenir les risques avérés peuvent-elles être mobilisées s'agissant de risques dits « incertains » ? Le contexte d'incertitude peut conduire à une opposition des principes de prévention et du principe de précaution.

Risque incertain : Le droit du travail prend en compte les risques avérés. Cependant, certaines dispositions du Code du travail qui concernent le risque chimique semblent prendre également en compte le risque incertain. L'article R. 4411-6, qui classe les substances et préparations considérées comme dangereuses, vise les substances et préparations cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction (CMR) de catégorie 2, « substances et préparations pour lesquelles il existe une forte présomption que l'exposition de l'homme [...] peut provoquer un cancer ou en augmenter la fréquence » et les CMR de catégorie 3, « substances et préparations préoccupantes pour l'homme [...] mais pour lesquelles les informations disponibles sont insuffisantes pour classer ces substances et préparations dans la catégorie 2 ».

¹ Agence française de sécurité sanitaire, de l'environnement et du travail

² Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail

Principe de prévention : Il s'agit d'un principe essentiel en matière de protection de la santé des travailleurs. Le Code du travail consacre un titre aux « principes généraux de prévention » qui se traduisent par des obligations mises à la charge de l'employeur mais également du travailleur. Son article L. 4121-2 donne la liste de neuf principes généraux de prévention que doit suivre l'employeur afin de protéger la santé au travail. Même le système de réparation, qui intervient en cas d'échec, aspect longtemps privilégié d'un point de vue juridique, a désormais une finalité préventive. On peut considérer que dans un contexte de risques incertains, les principes de prévention doivent être appliqués (en ce sens : note de service DGT du 18 février 2008 : « Malgré le contexte d'incertitude sur les dangers, il importe de rappeler que la réglementation existante en matière de prévention des risques professionnels doit s'appliquer, sous la responsabilité de l'employeur »).

Principe de précaution : Ce principe est l'expression d'une volonté d'encadrer les décisions à l'égard des situations à risques pour l'environnement et la santé publique pour lesquelles des connaissances font défaut. Il est mobilisé le plus souvent de manière excessive, sans considérer son cadre juridique originel qui est celui de la santé environnementale, ni ses destinataires qui sont les pouvoirs publics. Dans le cadre des politiques de santé-sécurité au travail des entreprises, le principe de précaution sort alors du domaine de la décision publique. Son influence sur le plan de la gestion des risques professionnels est discutable. Au contraire, dans le domaine de l'information, la mobilisation du principe de précaution paraît fondée. En effet, ce principe sous-tend un principe essentiel de recherche d'information qui suppose de suivre l'évolution des connaissances sur les risques et d'évaluer les actions menées pour connaître ces risques.

Rétrospective

Il n'existe pas à l'heure actuelle de dispositif juridique spécifique applicable à la protection de la santé des travailleurs susceptibles d'être exposés aux nanomatériaux. Les dispositions édictées par le Code du travail en vue de protéger la santé des travailleurs peuvent être mobilisées. Des instruments juridiques non dédiés à la protection des travailleurs présentent également un intérêt réel.

Mobilisation d'instruments juridiques de protection des travailleurs non spécifiques aux nanomatériaux : réglementation générale et réglementation concernant les produits chimiques

On peut considérer qu'actuellement, la prévention des risques pour les salariés exposés aux nanomatériaux relève autant des mesures générales édictées par le Code du travail que des mesures spécifiques prévues pour le risque chimique. Les agences sanitaires, considérant les nanoparticules comme aussi toxiques, voire plus dangereuses, que les substances de même nature chimique de taille supérieure, proposent de leur appliquer les mêmes exigences réglementaires qu'aux agents chimiques dangereux (Afsset, Nanomatériaux et sécurité au travail, rapport, mai 2008).

Depuis, la loi de modernisation sociale du 17 janvier 2002, transcription de la directive 89/391/CEE du 12 juin 1989, le droit du travail retient une approche élargie de la santé au travail avec la consécration de sa dimension psychologique. Il confie également la mission de la protéger à plusieurs acteurs. L'évolution récente se traduit par un renforcement des obligations à la charge de l'employeur, par une reconnaissance de droits aux travailleurs, par un développement de la protection de la santé par les relations collectives et par un élargissement du rôle du médecin du travail.

L'article L. 4121-1 du Code du travail prévoit que l'employeur doit prendre « les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé physique et mentale des travailleurs » en s'appuyant sur les principes généraux de prévention. Le juge a accru de façon considérable la portée de cette disposition en mettant à la charge de l'employeur une obligation de sécurité de résultat qui doit se traduire par la mise en place de mesures effectives de prévention. S'agissant de risques nouveaux comme les nanomatériaux, on peut considérer que ce caractère d'effectivité des mesures de prévention implique que l'employeur les adapte régulièrement en fonction de l'évolution des connaissances scientifiques. Une des difficultés principales est liée à son obligation d'évaluation des risques en raison du défaut de fiabilité des instruments de mesure en la matière. En ce qui concerne la prévention du risque chimique, les dispositions spécifiques aux produits dangereux sont encore plus détaillées. L'employeur doit notamment réduire au minimum le nombre de travailleurs exposés ou susceptibles de l'être, ce qui semble être envisageable pour les nanomatériaux, en général manipulés en faible quantité.

La participation des travailleurs à la gestion des risques liés aux nanomatériaux implique que ceux-ci soient informés des risques et des mesures prises pour y remédier et formés à la sécurité et à l'utilisation des moyens de prévention. L'obligation de sécurité du salarié implique que celui-ci soit informé des risques et des mesures prises pour y remédier et formé à la sécurité et à l'utilisation des moyens de prévention. L'obligation salariale de sécurité est dépendante des efforts de l'employeur en la matière. Le travailleur supporte une autre obligation, l'alerte. Le travailleur a-t-il cependant l'obligation d'alerter sur un risque incertain ? Il peut tout aussi bien craindre d'être sanctionné pour ne pas avoir alerté, qu'au contraire redouter qu'on lui reproche d'alerter sans raison valable. La question se pose également de savoir si le travailleur peut exercer son droit de retrait dans l'hypothèse d'un risque incertain. La crainte d'être exposé à un risque, pour l'heure non avéré, permet-elle au salarié de bénéficier de la protection prévue par l'article L. 4131-3 du Code du travail ?

De façon générale, l'action des institutions représentatives du personnel est essentielle afin de faire apparaître les situations dans lesquelles la santé des salariés peut être altérée. Le droit des relations collectives constitue donc un véritable enjeu pour développer une démarche de vigilance par rapport au risque lié aux nanomatériaux. Le CHSCT³, tout d'abord, a une mission très large qui consiste à « contribuer à la protection de la santé physique et mentale et de la sécurité des travailleurs ». Ses attributions ont été progressivement étendues par la loi et à l'initiative de la jurisprudence. Particulièrement, le recours à l'expert pourrait devenir un instrument de blocage au moins temporaire d'un projet de l'entreprise lorsque, par exemple, le CHSCT n'est pas assuré que ce projet ne présente pas de risque pour la santé des salariés ou que ces risques sont maîtrisés.

³ Comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail

Cependant, quel recours à l'expertise envisager alors qu'aucun expert agréé n'est compétent sur le sujet des nanomatériaux ? Les délégués du personnel peuvent également agir en faveur de la protection de la santé des travailleurs exposés aux nanomatériaux. Ils disposent, en effet, d'un pouvoir d'alerte en matière de santé au travail qui pourrait être mobilisé face à ce type de risque.

La mission principale du médecin du travail qui consiste à éviter toute altération de la santé des travailleurs du fait de leur travail peut se trouver également perturbée par l'incertitude liée aux nanomatériaux. La réforme de l'organisation de la médecine du travail s'inscrit notamment dans un contexte de réflexion sur la surveillance de nouveaux risques dont certains sont à effets retards comme l'amiante. Elle formalise l'exercice de la médecine du travail au sein d'équipes pluridisciplinaires. Une initiative de la réforme est d'une utilité particulière dans un débat sur les risques incertains. Il s'agit de la mise en place d'une procédure écrite d'alerte à laquelle l'employeur doit répondre également par écrit en cas de refus des propositions du médecin (art. L. 4624-3 du Code du travail).

On peut noter certaines difficultés d'application des règles évoquées au cas des nanomatériaux dans la mesure où elles ont été construites pour les risques connus. En toute hypothèse, l'incertitude ne doit pas empêcher l'entreprise de prendre des mesures. Le problème de la connaissance des risques ou de l'information peut être amélioré par des dispositifs non dédiés à la protection des travailleurs.

Mobilisation d'instruments juridiques non dédiés à la protection des travailleurs : règlement REACH⁴ et déclaration annuelle des substances à l'état nanoparticulaire

Le règlement REACH du 18 décembre 2006 impose aux industriels l'obligation de transmettre des informations pertinentes relatives aux substances qu'ils produisent ou exploitent à l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA). Il prévoit également une procédure d'autorisation pour les substances « extrêmement préoccupantes » afin de limiter les risques pour l'homme et l'environnement. Les nanomatériaux s'ils ne sont pas expressément visés par le règlement sont concernés en tant que substances. La principale difficulté s'agissant de la procédure d'enregistrement réside dans le fait qu'elle ne s'applique qu'aux productions supérieures à une tonne par an et par fabricant. Or, la plupart des nanomatériaux sont produits ou importés dans des quantités moindres et, par conséquent, ne sont pas concernés par cette procédure. Quant à la procédure d'autorisation, la difficulté est liée à la qualification de substances « extrêmement préoccupantes ».

Le dispositif de déclaration annuelle des substances à l'état nanoparticulaire, prévu par la loi du 12 juillet 2010 dite Grenelle II, est entré en vigueur en France depuis le 1^{er} janvier 2013. Au-delà de 100 grammes par an et par substance, les fabricants, les importateurs et les distributeurs doivent déclarer leur identité, les quantités, les propriétés et les usages de ces substances ainsi que l'identité des utilisateurs professionnels (décret n° 2012-232 du 17 février 2012). Est également prévue la transmission des informations relatives aux dangers et aux expositions auxquelles elles sont susceptibles de conduire, ou utiles à l'évaluation des risques pour la santé et l'environnement.

⁴ Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des produits chimiques

Prospective

Sur ce point, une remarque préalable s'impose qui peut éclairer le sens de l'évolution de l'encadrement juridique des nanomatériaux dans les années à venir. Cette étude conduit à s'interroger sur les rapports entre le droit et la science. Or, on peut considérer que le juriste a notamment pour rôle d'organiser le progrès scientifique en l'accompagnant et parfois en lui résistant, la technique ne devant pas prendre le pas sur l'homme.

Le nombre exact des travailleurs exposés aux nanomatériaux est encore imprécis mais il est certain que la population concernée ne cesse d'augmenter puisque les nanotechnologies sont intégrées dans la plupart des secteurs de l'industrie (chimie, automobile, cosmétique, pharmacie, énergie...). Selon la Commission européenne, les nanotechnologies pourraient entraîner l'emploi direct de plus de deux millions de personnes, d'ici 2015. La question de l'encadrement juridique des nanomatériaux dans les années à venir reste pertinente.

Les tendances du passé peuvent-elles se poursuivre ?

Les enseignements de l'affaire de l'amiante peuvent se révéler particulièrement utiles. Ils devraient permettre de prévenir le renouvellement de catastrophes en matière de santé et de sécurité au travail. La réglementation a évolué aboutissant à une interdiction généralisée de l'utilisation de l'amiante et de sa mise sur le marché. Cependant, malgré la connaissance du risque dès la fin du XIX^{ème} siècle, la réglementation a été tardive, insuffisante et mal appliquée, démontrant ainsi la carence de l'État et la responsabilité des entreprises. Le droit de la santé au travail en a été profondément modifié. Cette affaire a également montré la difficulté des acteurs syndicaux à se saisir efficacement et rapidement des questions liées aux toxiques professionnels.

S'agissant du rôle confié aux acteurs de la prévention, l'évolution récente qui se traduit par un renforcement des obligations à la charge de l'employeur, par une reconnaissance de droits aux travailleurs, par un développement de la protection de la santé par les relations collectives et par un élargissement du rôle du médecin du travail devrait se poursuivre. Il en est ainsi de la tendance à l'élargissement des attributions du CHSCT comme garant de la protection de la santé au travail. Ce renforcement de ses pouvoirs peut cependant poser certaines difficultés notamment en ce qui concerne la professionnalisation du CHSCT.

De nombreux risques invitent à s'interroger sur l'élargissement du domaine de la prévention des risques dans l'entreprise aux questions de santé publique et environnementale. En ce sens, la loi du 16 avril 2013 relative à l'indépendance de l'expertise en matière de santé et d'environnement et à la protection des lanceurs d'alerte instaure, dans les entreprises, un droit d'alerte reconnu au travailleur et au CHSCT en matière de santé publique et d'environnement. Le droit à l'information est désormais complété par une information des travailleurs sur les risques que les produits ou procédés de fabrication peuvent faire peser sur l'environnement ou sur la santé publique et sur les mesures prises pour y remédier.

La tendance à une diversification des dispositifs d'alerte présente également un intérêt particulier dans l'hypothèse de risques incertains comme les nanomatériaux. Outre le droit d'alerte reconnu au délégué du personnel et au travailleur, la loi du 20 juillet 2011 a

instauré une procédure d'alerte à l'initiative du médecin du travail et la loi du 16 avril 2013 a élargi le droit d'alerte du CHSCT au risque grave pour la santé publique ou l'environnement.

Face à l'incertitude du cadre juridique en matière de nanomatériaux, certaines entreprises peuvent renoncer à les utiliser, d'autres s'engager vers l'élaboration de normes privées. Dans l'attente de l'adoption de dispositions réglementaires spécifiques, des industriels ont ainsi fait le choix de la mise en œuvre de normes privées de protection des travailleurs. Ces normes peuvent être consignées dans des chartes, des guides de bonnes pratiques, les règlements intérieurs, ou bien encore dans les contrats. Cette démarche est approuvée par ceux qui considèrent que les règles du Code du travail sont peu adaptées pour appréhender l'incertitude scientifique.

S'agissant de REACH, sa révision ne devrait pas modifier fondamentalement le dispositif actuel. La Commission européenne, dans son rapport général sur REACH du 5 février 2013, considère que « le règlement REACH offre le meilleur cadre possible pour la gestion des risques liés aux nanomatériaux, [...] mais il s'est avéré que des exigences plus spécifiques devaient être fixées pour les nanomatériaux dans ce cadre. La Commission envisage de modifier certaines des annexes du règlement REACH et encourage l'ECHA (European chemicals agency) à élaborer de nouvelles orientations pour les enregistrements après 2013 ». La Commission réalisera une analyse d'impact des options réglementaires pertinentes, en particulier des éventuelles modifications des annexes du règlement REACH, afin de garantir une plus grande clarté quant à la façon dont les nanomatériaux sont traités et dont la sûreté est démontrée dans les dossiers d'enregistrement.

Plus généralement, la Commission européenne estime que la législation européenne couvre les risques potentiels des nanomatériaux.

Existe-t-il des facteurs de rupture des tendances du passé ?

Les ruptures pourraient être d'ordre politique, traduisant une volonté soit de privilégier la protection de la santé des travailleurs et d'interdire l'utilisation des nanomatériaux aussi longtemps qu'il existera un doute sur leur toxicité, soit de favoriser le développement des nanomatériaux et de retenir que les règles de droit ne s'appliquent pas dans l'hypothèse d'un risque incertain. Ces deux ruptures apparaissent peu probables en raison à la fois de la diversité de taille, de forme, de procédés... des nanomatériaux, de leur potentiel de développement et du sens de l'évolution des règles, notamment du droit du travail.

Hypothèses

Hypothèse 1. Absence d'évolution à très court terme de la réglementation spécifique aux nanomatériaux

En l'absence d'avancée scientifique permettant d'établir la nature précise des dangers d'une exposition déterminée aux nanomatériaux, le droit n'évolue pas en la matière. Dans ce contexte, les entreprises les plus en pointe dans la fabrication et l'utilisation des nanoproduits continuent à appliquer les méthodes de protection les plus élevées possibles en matière de sécurité. Cette stratégie pourrait leur permettre de se prévaloir le cas échéant de leur expérience pour influencer sur les travaux législatifs futurs aboutissant à l'adoption de règles spécifiques.

Hypothèse 2. Élaboration d'une réglementation spécifique aux nanomatériaux en raison d'une meilleure connaissance des risques

Élaboration d'une réglementation spécifique encadrant la fabrication et l'utilisation des nanomatériaux se traduisant notamment par un renforcement des obligations à la charge de l'employeur et une amélioration de l'information due aux travailleurs et à leurs représentants. Cette hypothèse est liée à des avancées scientifiques en matière d'instruments de mesure des risques liés aux nanomatériaux. Malgré le durcissement de la réglementation, cette situation est gage de sécurité juridique pour les entreprises et favorise le développement des nanomatériaux.

Hypothèse 3. Élaboration d'une réglementation très restrictive conduisant à l'interdiction de certains nanomatériaux

Législation très restrictive conduisant à une interdiction de la fabrication et de l'utilisation de certains nanomatériaux comme les nanotubes de carbone. Cette hypothèse a pour effet de limiter très fortement le développement des nanomatériaux en général, en raison des contraintes importantes pesant sur les entreprises et du risque de confusion entre les différentes catégories.

Références

Dedessus-Le Moustier N. et Drais E., Le rôle de l'employeur et du travailleur dans la prévention des risques liés aux nanotubes de carbone : la prévention à l'épreuve des risques incertains, in « De l'innovation à l'utilisation des nanomatériaux : le cadre normatif des nanotubes de carbone » sous la direction de S. Lacour, S. Desmoulin-Canselier et N. Hervé-Fournereau, Editions Larcier 2012, p.161-185.

Dedessus-Le Moustier N. et Drais E., La place des relations collectives dans la protection de la santé des salariés exposés aux nanomatériaux : défis pratiques et questions nouvelles, in « Des nanotechnologies aux technologies émergentes : la régulation en perspective » sous la direction de S. Lacour, Editions Larcier 2013, p.45-66.

Juet E., Lacour S., Leca N., Les nanotubes de carbone dans Reach : les NTC sont-ils des substances chimiques comme les autres ?, in « De l'innovation à l'utilisation des nanomatériaux : le cadre normatif des nanotubes de carbone » sous la direction de S. Lacour, S. Desmoulin-Canselier et N. Hervé-Fournereau, Editions Larcier 2012, p.229-248.

El Badawi L., Les nanotechnologies et la protection de la santé des travailleurs, Semaine Sociale Lamy 2013, n° 1567, p.7-10.

Les standards et les normes techniques

Aurélie Delemarle, École des Ponts ParisTech

Définition

Une norme technique désigne un ensemble de spécifications décrivant un objet, un être ou une manière d'opérer. La norme est élaborée dans le cadre de comités d'experts au sein d'organismes spécifiques¹. L'ISO, principal organisme d'élaboration de normes, la définit comme « un document qui définit des exigences, des spécifications, des lignes directrices ou des caractéristiques à utiliser systématiquement pour assurer l'aptitude à l'emploi des matériaux, produits, processus et services » (www.iso.org). Il en résulte un principe servant de règle et de référence technique. Il est important de noter qu'une norme n'est pas obligatoire, son adhésion est un acte volontaire, sauf si elle est rendue obligatoire par son inscription dans un texte réglementaire ou un texte de loi.

Les normes techniques ont pour objectif d'assurer le développement de produits et services efficaces (garantie par rapport au descriptif et conformité) et sûrs (protection des consommateurs). Elles ont également pour objectif de faciliter l'interopérabilité des biens et services et ainsi d'améliorer le commerce entre les pays (ISO², 2009), ce qui concourt à la diffusion des innovations.

La norme est également un outil d'avantage compétitif pour les entreprises. La standardisation des processus de production peut permettre une meilleure efficacité. D'autre part, la norme est un outil de différenciation par rapport à la concurrence. C'est pourquoi les normes sont essentiellement développées par les industriels.

¹ Les organismes de normalisation s'organisent à plusieurs échelons :

* au niveau national : AFNOR (Association française de normalisation) ; SSC (Standards Council of Canada) ; DIN (Deutsche Industrie Normen) ; BSI (British Standard Institute) ; ANSI (American National Standard Institute) ; JISC (Japanese Industrial Standard Committee) ; KATS (Korean Association for Technology and Standards)

* au niveau international : l'ISO (International Organization for Standardization), 1947 ; le IEC (Commission Electrotechnique Internationale) ; l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) ;

* au niveau européen : le CEN (Comité européen de normalisation), 1961 ; le CENELEC (Comité européen de normalisation pour l'électrotechnique) ; l'ETSI (European Telecommunications Standard Institut) ;

* les comités internationaux disposent de comités nationaux miroirs dans chaque pays membre de l'organisation. Les organismes de normalisation peuvent être généralistes comme l'ISO ou spécialisés dans des industries ou domaines d'application comme l'IEC dans l'électronique et l'électrotechnique.

² http://www.iso.org/iso/fr/about/discover-iso_wh_at-standards-do.htm

Le standard est proche de la norme, et dans les pays anglo-saxons, le seul terme de standard recouvre les deux notions. Le standard peut être défini comme un référentiel publié par une entité autre qu'un organisme de normalisation. Le standard résulte donc d'un consensus plus restreint que la norme puisqu'il n'est construit que par un petit groupe d'acteurs au sein d'un consortium. Si ce standard se diffuse largement au-delà de ce groupe et est accepté par le marché comme le standard dominant, on parle alors de standard de facto (standard de fait).

Cette variable peut-être suivie par l'observation de l'activité des instances de normalisation d'une part et par le suivi des activités des consortia d'acteurs qui développent des documents dans le but de les faire adopter par le plus grand nombre, pour en faire ainsi des standards de fait.

Rétrospective

Les standards développés par des consortia d'acteurs

À ce jour, il n'y a que peu de standards « nanotechnologiques » sur le marché. Les standards existants concernent l'accompagnement et le suivi de la gestion des risques. Ils ont été développés par toutes sortes d'organisations, ONG, entreprises, gouvernements ou acteurs de la recherche. Leur succès, c'est-à-dire l'utilisation par des tiers du standard défini, reste très limité. Seuls Environmental Defense et DuPont ont réussi à promouvoir leur standard en l'intégrant au cœur d'un standard technique de l'ISO TC229.

Le responsable NanoCode britannique³

Le NanoCode responsable britannique (2008) résulte d'une initiative conjointe de trois organisations britanniques : une société de gestion d'actifs (Insight Investment), une association professionnelle (Nanotechnology Industries Association) et un institut de recherche (La Royal Society). Le projet initié en 2006 vise à explorer les répercussions sociales et économiques des incertitudes scientifiques, technologiques sociales et commerciales liées aux nanotechnologies. Le NanoCode compte sept principes. Il vise à établir un consensus sur ce qui constitue de bonnes pratiques afin que les entreprises puissent aligner leurs processus sur la base des bonnes pratiques émergentes. L'objectif était ainsi de former une base pour l'élaboration d'indicateurs de conformité.

Le Code de conduite pour une recherche responsable dans les nanosciences et nanotechnologies

Le Code de conduite pour une recherche responsable dans les nanosciences et nanotechnologie est une initiative de la Commission européenne (2008)⁴. Développé sur base d'une expérience britannique (le NanoCode), il a été développé par la Commission européenne avec l'appui de partenaires industriels et d'instituts de recherche. Tous les autres acteurs volontaires ont été invités (via le site internet) à compléter et commenter

³ <http://www.nanoandme.org/social-and-ethical/corporate-responsibility/responsible-nano-code/>

⁴ http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/nanocode-rec_pe0894c_en.pdf

le code de conduite⁵. Basé sur le principe de précaution, ce code, d'application volontaire, porte sur sept principes généraux, y compris la durabilité, la précaution, l'inclusivité et la responsabilisation. Son objectif principal est d'aider les instituts de recherche, les universités et les entreprises au sein de l'UE à assurer un développement et une utilisation sûrs des nanotechnologies dans un contexte d'incertitudes scientifiques et toxicologiques. Le code de conduite a fait l'objet d'une évaluation en 2012. Son utilisation demeure, en 2013, encore très limitée : aucun grand acteur des nanosciences et technologies ne rapporte son utilisation (Delemarle et Larédo, à venir).

NanoRisk

NanoRisk résulte d'une collaboration entre l'entreprise chimique DuPont et l'ONG Environmental Defense. L'objectif est « d'aider les organisations qui développent des applications utilisant des nanomatériaux en fournissant un moyen de traiter les cas de renseignements incomplets ou incertains en utilisant des hypothèses raisonnables et pratiques de gestion des risques appropriées » (Environmental Defense et DuPont, 2007). Le document comprend des conseils sur la façon de communiquer des informations et des décisions aux parties prenantes. Le document a été repris et adapté dans le cadre de l'ISO TC229.

Code de conduite de BASF

L'entreprise BASF a été la première en 2007 à développer un code de conduite⁶ spécifique pour les nanotechnologies. Basé sur les principes de gestion responsable, le code décrit quatre engagements détaillant l'approche de l'entreprise⁷.

La certification Soil Association Organic

En 2008, Soil Association Certification Ltd est devenue la première organisation au monde à interdire les nanomatériaux synthétiques dans les produits qu'elle certifie « biologiques ». En vertu du standard développé par cette association, les producteurs et les transformateurs biologiques ne doivent pas utiliser d'ingrédients contenant des nanoparticules manufacturées⁸. En 2011, l'application de la Soil Association Logo concerne principalement les cosmétiques, la nourriture et les vêtements.

L'OCDE WPMN

Il existe une longue tradition pour les décideurs des pays de l'OCDE de discuter des risques liés aux produits chimiques. Dans cette tradition, l'OCDE s'est penchée sur les questions de risque pour la santé concernant les nanoparticules. Initié en 2006, le groupe de travail sur la sécurité des nanomatériaux manufacturés (WPMN) décrit sa mission de la façon suivante: *“to ensure that the approaches for hazard, exposure and risk assessment for manufactured nanomaterials are of a high quality, science-based and internationally harmonised”*⁹. Ses missions sont « d'élaborer et de mettre en œuvre un programme de travail (...), promouvoir la

⁵ http://ec.europa.eu/research/science-society/document_library/pdf_06/nanocode-apr09_en.pdf

⁶ De nombreuses entreprises impliquées dans les nanosciences et technologies ont également développées/formalisées des lignes de conduites spécifiques sans pour autant développer un code de conduite en tant que tel.

⁷ <http://www.basf.com/group/corporate/nanotechnology/en/microsites/nanotechnology/safety/code-of-conduct>.

⁸ La taille moyenne des particules doit être de 200 nm ou moins, et la taille minimale de ces particules de 125nm ou moins.

⁹ www.oecd.org, juillet 2014, [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=env/jm/mono\(2008\)](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=env/jm/mono(2008)).

coopération internationale dans les domaines des nanomatériaux manufacturés liés à la sécurité, la santé et l'environnement... ». Les principaux sujets inclus dans le programme de travail sont : définitions, nomenclature et caractérisation (propriétés physico-chimiques, utilisations) ; devenir et effets (identification des dangers, risques, exposition et méthodes d'évaluation des risques) pour l'environnement ; exposition humaine et effets sur la santé (identification des dangers, risques, exposition et méthodes d'évaluation des risques) ; échange d'informations sur les cadres réglementaires et de gestion des risques (limités essentiellement au secteur des produits chimiques) ainsi que les avantages environnementaux. Les documents développés par l'OCDE ont pour objectif d'être le plus utilisés et de fait de devenir des standards ou des normes.

Projets lancés entre 2006 et 2011 par l'OCDE WPMN	Principaux résultats (fin 2013)
Projet 1. Développement d'une base de données sur les recherches menées en santé humaine et sécurité environnementale	Inclut plus de 803 projets de recherche
Projet 2. Stratégies de recherche sur la santé humaine et la sécurité environnementale (EHS) des nanomatériaux manufacturés	
Projet 3. Tests de sécurité sur un échantillon représentatif de nanoparticules	Guidance Manual for the Testing of Manufactured Nanomaterials: OECD's Sponsorship Programme
Projet 4. Lignes directrices pour les tests et nanomatériaux manufacturés	"Preliminary Guidance Notes on Sample Preparation and Dosimetry for the Safety Testing of Manufactured Nanomaterials" et "Non-Inhalation Exposure Methods for Studies on the Pulmonary Toxicology of Nanoparticles" "Guidance Notes on Sample Preparation and Dosimetry for the Safety Testing of Manufactured Nanomaterials"
Projet 5. Coopération sur les programmes de déclarations volontaires	"Analysis of Information Gathering Initiatives on Manufactured Nanomaterials" "Report of the Questionnaire on Regulatory Regimes for Manufactured Nanomaterials"
Project 6. Co-operation on Risk Assessments	Rapport d'un séminaire "Risk Assessment of Manufactured Nanomaterials in Regulatory Context "(2009) "Risk Assessment of Manufactured Nanomaterials – Critical Issues"
Project 7. The Role of Alternative Test Methods in Nanotoxicology	Réunions d'experts
Project 8. Co-operation on Exposure mitigation and Exposure measurement	3 projets en cours. 2 études de cas (nano-argent et nano-or)
Project 9. Environmentally Sustainable Use of Nanotechnology	OECD Conference on the Potential Environmental Benefits of Nanotechnology: Fostering Innovation-Led Growth (2009) "National Activities on Life Cycle Assessment of Nanomaterials" and workshop on the Environmentally Sustainable Use of Manufactured Nanomaterials

Les normes

Les normes techniques devenues obligatoires car inscrites dans la loi¹⁰ ne seront pas traitées dans cette fiche variable.

L'ISO TC229

La normalisation a souvent été introduite *ex post* par rapport à l'introduction sur le marché des produits. Le comité technique (TC) 229 de l'ISO a été fondé en 2005 bien en amont de la mise sur le marché des produits issus des recherches sur les nanotechnologies. La mission du TC229 retranscrit d'ailleurs cet élément : *“to develop science-based standards for the field of nanotechnology in order to promote its commercial applications in a secure manner”*¹¹. Il est rare de voir un TC impliqué si en amont alors que le domaine scientifique est en émergence. Néanmoins, comme l'expliquent les responsables des groupes, ce travail est indispensable pour permettre la mise sur le marché de produits sûrs pour l'homme et l'environnement. Le travail de l'ISO a également pour objectif de servir de base à une législation internationale.

En 2013, 34 pays sont membres de ce comité et participent aux travaux et 11 en sont observateurs. Les acteurs les plus impliqués (en nombre) et les plus actifs sont : les Américains, les Britanniques, les Allemands, les Japonais, les Coréens du Sud et les Chinois. Il est à noter que seule la nationalité des délégués est censée importer dans les débats et que tous doivent œuvrer au bien commun. Néanmoins, si des stratégies existent par pays, des stratégies par acteurs y sont également sous-jacentes. La création du comité technique 229 à l'ISO a engendré la création des comités miroirs nationaux et, fait inhabituel, la normalisation technique se joue directement à l'échelle internationale : seuls les Chinois ont proposé une norme technique chinoise comme base de réflexion à l'échelle internationale (menant à la création du groupe de travail 4 sur les spécifications des nanomatériaux). Dans presque toutes les autres situations, ce sont les discussions au sein du TC229 qui ont alimenté les projets de normes (co-développées à l'échelle nationale et internationale). Il s'agit d'un point important de changement dans la gouvernance des marchés. Enfin, autre point important, l'ISO TC229 se positionne comme instance de coordination internationale : le TC229 développe des normes techniques transverses ; les comités techniques sectoriels développent ensuite des normes sectorielles (ainsi par exemple, le TC229 développe la terminologie sur la nanocellulose ainsi que les aspects de mesure et de caractérisation tandis que TAPPI, organisme

¹⁰ Il est à noter qu'aujourd'hui, l'essentiel de ce qui est considéré dans les lois ou réglementation concerne des adaptations de lois ou réglementations existantes (tableau 1).

REACH, EU, 2006
Novel Food Regulation, EU, 1997
Cosmetic products Regulation, EU, 2009
Toxic Substances Control Act Inventory Status Carbon Nanotubes, US, 2008
Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act, US, 1996
DTSC chemical call-in: carbon nanotubes, US - California, 2009
The Manufactured Nanoscale Health & Safety Ordinance, US - Berkeley, 2006
OSH Framework Directive, EU, 1989
NIOSH Occupational Exposure to Titanium Dioxide, US, 2011
French Code de l'Environnement, France, 2010

Tableau 1. Lois ou réglementations adaptées ou en cours d'adaptation pour les nanomatériaux, pays de développement et année.

¹¹ CR de l'assemblée générale le 12 juin 2009.

spécialisé dans la normalisation dans le papier, développe des normes sur la nanocellulose). Afin de jouer son rôle de coordinateur, l'ISO TC229 entretient des liaisons avec 30 autres comités ISO et 10 organisations extérieures à l'ISO (dont l'OCDE et la Commission européenne). De plus, deux des groupes de travail de l'ISO TC229 (JWG 1 et 2) sont communs avec le grand organisme de standardisation spécialisé dans l'électronique et l'électrotechnique (IEC).

Le comité ISO TC229 se réunit tous les six mois depuis 2005 (en plus de réunions de travail spécifiques, de *conference call* et de travail à distance). La réunion du comité biannuelle a des objectifs stratégiques pour les acteurs qui essaient de mobiliser des soutiens pour leurs projets d'une part et d'influencer le positionnement des autres projets à leur avantage d'autre part. C'est pourquoi de nombreux pays (parmi lesquels les États-Unis, le Japon, la Corée du Sud ou la Chine) ont déclaré la standardisation dans les nanotechnologies comme stratégie pour le développement et la compétitivité nationale. Le comité n'accepte plus de nouveaux projets de normes en dehors des objectifs définis dans sa feuille de route globale. Le comité TC229 dispose en effet d'un fonctionnement un peu différent des autres comités techniques puisque l'essentiel de son activité est tourné sur la création de nouveaux documents tandis que la routine des autres comités techniques est plutôt centrée sur la mise à jour et la réactualisation de documents techniques existants.

Le comité était présidé jusqu'en 2012 par un industriel britannique de la chimie (revêtement – IonBond Ltd). En 2012, c'est un industriel britannique de la pharmacie qui a repris cette position. Il a ouvert les activités du TC229 à la nanomédecine et la pharmacie, renouvelant ainsi les thématiques inscrites au programme du TC.

JWG1 Terminologie et nomenclature (commun ISO et IEC)

L'objectif du JWG1 est de permettre des transactions commerciales sécurisées et sûres en clarifiant l'objet même de la transaction et en assurant le consommateur et le citoyen de la sûreté de l'objet. Pour ce faire, le JWG1 travaille sur l'établissement d'une terminologie qui permettrait de décrire et de définir de façon « non ambiguë et claire » les nanotechnologies. Il explore de plus les possibilités de cadrage et de nomenclature qui seraient appropriées pour la régulation. Le JWG1 est particulièrement important dans ce dernier cas pour permettre d'harmoniser des règles qui se développent aux échelles nationales et supranationales.

Une grande difficulté pour ce groupe est que la définition et le classement des mots reposent sur une base scientifique mais que les résultats doivent servir à des industriels, pour des produits qui ne sont pas encore sur le marché. Des termes scientifiques et industriels désignant des mêmes choses peuvent être différents. Ou des termes purement scientifiques peuvent ne pas être considérés comme pertinents par les industriels. D'où des débats importants entre industriels et scientifiques (universitaires ou membres de laboratoires publics).

JWG2 Instrumentation et métrologie (commun ISO et IEC)

Ce groupe prépare essentiellement des spécifications techniques, chacune étant basée sur une méthode de mesure ou un instrument utilisable dans le champ des nanosciences et nanotechnologies.

WG 3 Environnement, hygiène et sécurité

Le groupe de travail est dirigé par les Anglais qui disposent d'instituts importants spécialisés dans le domaine. Cette force de frappe leur a permis de proposer des projets

de travail et de les soutenir par des documents de travail très finalisés qui laissent peu de place à des changements profonds de structure de texte. À noter, le projet sur l'évaluation des risques par bandes de dangers (*control banding*), seul projet coordonné par la France. Le WG3 est, en taille, le groupe de travail le plus important.

WG4 Spécifications des nanomatériaux

Le groupe de travail 4 est le plus proche des produits et des marchés. Créé en 2008, il est mené par les Chinois. Ce groupe est fortement composé d'industriels coréens, taiwanais et japonais, importants fabricants de nanomatériaux. Pour le moment, deux documents de travail ont été produits : sur le carbonate de calcium (CaCO_3) et le dioxyde de titane (TiO_2). Ils visent à établir des documents caractérisant les nanomatériaux pour les transactions entre professionnels. La difficulté de ces travaux réside dans le fait que les tests préconisés doivent être faisables et répliquables par les industriels et que ceux-ci n'ont pas toujours les moyens d'utiliser des instruments très sophistiqués. Les séances se sont organisées autour de présentations d'experts sur des méthodes qui sont utilisables par les industriels.

Deux groupes de réflexion sont transverses au TC229 et montre la volonté d'ouverture et de prise en compte de thématiques plus générales : « *nanotechnology and sustainability* » et « *societal dimensions of nanotechnology* ».

A ce jour, le TC229 a publié 32 documents et 18 sont en cours de développements (voir Annexe 1).

Le CEN TC352

Le CEN (Comité européen de normalisation) TC352 Nanotechnologies a organisé son activité de façon complémentaire à celui de l'ISO TC229 (mandat de la Commission européenne 98/34). Ainsi le CEN, le CENELEC et l'ETSI ont été enjoins à se coordonner avec les European Technology Platforms, les groupes d'intérêts (ANEC), les associations environnementales (ECOS) et les associations de travailleurs (ETUI-REHS et NORMAPME).

Les programmes européens du programme cadre 7 (FP7)

Les programmes européens via le programme cadre 7 ont également développé un pan lié à la standardisation. Ils se sont concentrés sur la métrologie et la caractérisation d'une part et sur la toxicologie d'autre part. Il est à noter que les investissements dans ce dernier domaine sont très importants en Europe et, qu'ils ont été décriés dans une certaine mesure, car les financements ont de ce fait été plus limités sur d'autres aspects (i.e. les applications), plus liés à la compétitivité de l'Europe.

NMP – 2007-1.2-4 : coordination en nanométrie

Cette action de coordination devait aborder l'identification et la coordination des activités menées en Europe dans le domaine de la nanométrie ; en particulier en matière (i) de caractérisation des réactions, des matériaux, des mécanismes, des structures et des systèmes à l'échelle du nanomètre, et (ii) d'évaluation des performances et d'amélioration de la méthodologie, de la pratique opérationnelle et de l'utilisation de l'équipement. Les aspects de « santé, sécurité et impact environnemental » des nanotechnologies ne sont pas spécifiquement au cœur de cette action de coordination.

NMP – 2007-2.1-3 : caractérisation des matériaux nanostructurés

Cette action se focalise sur la diffusion de techniques nouvelles et l'élaboration de normes dans le domaine de caractérisation des nanomatériaux (notamment pour les PME). L'objectif est également de développer ou de lancer des travaux préparatoires pour le développement de normes dans le domaine de la caractérisation des matériaux nanostructurés.

Nanosafe

Ce projet de recherche se concentre sur la production et l'utilisation sûre de nanomatériaux. Le projet développe l'évaluation et la gestion des risques pour la production industrielle sécurisée de nanoparticules. Dans la continuation de Nanosafe, Nanosafe 2 est un projet intégré couvrant un grand nombre de domaines techniques : (1) techniques de détection et de caractérisation ; (2) évaluation des risques pour la santé ; (3) développement des systèmes de production industrielle sécurisés ; (4) aspects environnementaux et sociétaux (www.nanosafe.org).

Nano-Strand

Le LNE, Laboratoire national de métrologie et d'essais, coordonne ce projet dont les principaux objectifs sont d'identifier les besoins, les attentes et les priorités de tous les acteurs concernés par la caractérisation des nanomatériaux et de déterminer qui peut y répondre au mieux, afin d'en tirer par la suite une feuille de route pour la normalisation européenne. La feuille de route doit également fournir des sujets de recherche pour le 7^e programme-cadre de recherche de l'UE (7^e PC).

Prospective

Les travaux sur les normes techniques vont se développer car les marchés pour les nanotechnologies se structurent ; les besoins en normalisation/standardisation vont donc aller croissants.

Plusieurs éléments seront centraux dans l'évolution des normes :

- les normes et les standards sont reconnus comme des outils de compétitivité stratégique par l'ensemble des acteurs, publics ou privés ;
- la normalisation semble se jouer surtout à l'échelle internationale. Comme indiqué précédemment, les normes ne se construisent plus d'abord au niveau des pays, mais directement au niveau international (CEN-ISO par exemple).

Les enjeux de coordination sont importants :

- aucun acteur, public ou privé, aucun pays ne peut développer des normes ou des standards seul étant donné la complexité des objets et la somme des expertises qui sont nécessaires ;

- une organisation seule ne peut développer les normes ou les standards car aucune n'est légitime sur l'ensemble des sujets à cause de la complexité des nanotechnologies ;
- les organismes sectoriels se coordonnent avec l'ISO ou l'IEC pour organiser une répartition des rôles dans l'écriture des normes. Il semble que les normes transversales se développent au sein des organismes de coordinations comme l'ISO et que les normes plus sectorielles se développent ensuite au sein des organismes spécifiques sectoriels ;
- les coordinations se développent à tous les niveaux pour éviter des redondances dans le travail. Ainsi les normes sur les particules ultrafines doivent également être prises en considération même si elles ne sont pas dans un comité technique labellisé nanotechnologies. L'enjeu est donc de cibler l'ensemble des activités relatives aux nanotechnologies.

Hypothèses

Hypothèse 1. Renforcement de la dimension stratégique de la normalisation : coordination par les acteurs

Dans cette hypothèse, les acteurs industriels poussent les marchés à se structurer pour se développer et ils utilisent la normalisation pour y parvenir. La normalisation se renforce comme outil stratégique : c'est un outil pour les industriels pour assurer leur compétitivité. Les États ne sont pas moteurs dans cette dynamique, au mieux, ils l'accompagnent.

Néanmoins, les acteurs n'agissent pas de façon erratique. Ils ne peuvent chacun développer leurs propres normes et, pour favoriser les échanges, ils continuent de travailler ensemble dans les grandes instances internationales de normalisation. Ils agissent de façon coordonnée au travers des structures de normalisation qui ont pris de l'importance comme l'ISO. Celles-ci ont une légitimité reconnue pour regrouper l'expertise nécessaire à l'élaboration de normes techniques. Ces instances renforcent leur coopération pour éviter la redondance des travaux. Les standards transverses se développent dans les instances de coordination labellisées nanotechnologies, tandis que les instances de normalisation sectorielles développent des standards adaptés à chaque industrie.

Hypothèse 2. Coordination du marché par les États

Dans cette hypothèse, les acteurs étatiques organisent les marchés : les questions de sécurité, de santé humaine et environnementale sont importantes alors que les produits basés sur les nanotechnologies entrent sur le marché. Les marchés étant globaux, les États ne peuvent laisser les acteurs seuls structurer les marchés. Ils développent des stratégies et des priorités communes et se coordonnent dans ces instances comme l'OCDE. Ils peuvent aussi intervenir dans la standardisation en donnant des priorités importantes aux organisations assurant ces fonctions (comme le CEN).

Hypothèse 3. Marchés chaotique / concurrence dans la gouvernance (OCDE, ISO, labels multiples, etc.)

Dans cette hypothèse, les acteurs publics ou privés n'arrivent pas à s'organiser collectivement. Chaque acteur ou groupe d'acteurs agit individuellement. Certains investissent largement dans la normalisation soit au niveau national, soit au niveau international. D'autres développent des labels, des codes de conduites, des bonnes pratiques ou des standards par ailleurs. Chacun essayant de faire adopter ses produits par d'autres pour gagner en compétitivité. Il en résulte une très grande fragmentation de la gouvernance. Les marchés sont donc peu structurés, mal organisés, ce qui impacte la rentabilité des secteurs concernés.

Annexe 1. Projets développés au sein de l'ISO TC229

Standard and/or project	Stage
ISO/TS 10797:2012 Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using transmission electron microscopy	published
ISO/TS 10798:2011 Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometry analysis	published
ISO 10801:2010 Nanotechnologies - Generation of metal nanoparticles for inhalation toxicity testing using the evaporation/condensation method	published
ISO 10808:2010 Nanotechnologies - Characterization of nanoparticles in inhalation exposure chambers for inhalation toxicity testing	published
ISO/TS 10867:2010 Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using near infrared photoluminescence spectroscopy	published
ISO/TS 10868:2011 Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using ultraviolet-visible-near infrared (UV-Vis-NIR) absorption spectroscopy	published
ISO/TR 10929:2012 Nanotechnologies - Characterization of multiwall carbon nanotube (MWCNT) samples	published
ISO/TS 11251:2010 Nanotechnologies - Characterization of volatile components in single-wall carbon nanotube samples using evolved gas analysis/gas chromatograph-mass spectrometry	published
ISO/TS 11308:2011 Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using thermogravimetric analysis	published
ISO/TR 11360:2010 Nanotechnologies - Methodology for the classification and categorization of nanomaterials	published
ISO/TR 11811:2012 Nanotechnologies - Guidance on methods for nano- and microtribology measurements	published
ISO/TS 11888:2011 Nanotechnologies - Characterization of multiwall carbon nanotubes - Mesoscopic shape factors	published

Standard and/or project	Stage
ISO/TS 11931:2012 Nanotechnologies - Nanoscale calcium carbonate in powder form - Characteristics and measurement	published
ISO/TS 11937:2012 Nanotechnologies - Nanoscale titanium dioxide in powder form - Characteristics and measurement	published
ISO/DIS 12025 Nanomaterials - Quantification of nano-object release from powders by generation of aerosols	on-going project
ISO/TS 12025:2012 Nanomaterials - Quantification of nano-object release from powders by generation of aerosols	published
ISO/TR 12802:2010 Nanotechnologies - Model taxonomic framework for use in developing vocabularies - Core concepts	published
ISO/TS 12805:2011 Nanotechnologies - Materials specifications - Guidance on specifying nano-objects	published
ISO/TR 12885:2008 Nanotechnologies - Health and safety practices in occupational settings relevant to nanotechnologies	published
ISO/TS 12901-1:2012 Nanotechnologies - Occupational risk management applied to engineered nanomaterials - Part 1: Principles and approaches	published
ISO/DTS 12901-2 Nanotechnologies - Occupational risk management applied to engineered nanomaterials - Part 2: Use of the control banding approach	on-going project
ISO/TR 13014:2012 Nanotechnologies - Guidance on physico-chemical characterization of engineered nanoscale materials for toxicologic assessment	published
ISO/TR 13014:2012/Cor 1:2012	published
ISO/TR 13121:2011 Nanotechnologies - Nanomaterial risk evaluation	published
ISO/TS 13278:2011 Nanotechnologies - Determination of elemental impurities in samples of carbon nanotubes using inductively coupled plasma mass spectrometry	published
ISO/TR 13329:2012 Nanomaterials - Preparation of material safety data sheet (MSDS)	published
ISO/PRF TS 13830 Guidance on the labelling of manufactured nano-objects and products containing manufactured nano-objects	on-going project
ISO/TS 14101:2012 Surface characterization of gold nanoparticles for nanomaterial specific toxicity screening: FT-IR method	published
ISO/DTR 14786 Nanotechnologies - Framework for nomenclature models for nano-objects	on-going project
ISO/DTS 16195 Nanotechnologies - Generic requirements for reference materials for development of methods for characteristic testing, performance testing and safety testing of nanoparticle and nanofibre powders	on-going project
ISO/NP TR 16196 Nanotechnologies - Guidance on sample preparation methods and dosimetry considerations for manufactured nanomaterials	on-going project

Standard and/or project	Stage
ISO/NP TR 16197 Nanotechnologies - Guidance on toxicological screening methods for manufactured nanomaterials	on-going project
ISO/NP TS 16550 Nanoparticles - Determination of muramic acid as a biomarker for silver nanoparticles activity	on-going project
ISO/DTS 17200 Nanotechnology - Nanoparticles in powder form - Characteristics and measurements	on-going project
ISO/NP TR 17302 Nanotechnologies - Framework for identifying vocabulary development for nanotechnology applications in human healthcare	on-going project
ISO/TS 27687:2008 Nanotechnologies - Terminology and definitions for nano-objects - Nanoparticle, nanofibre and nanoplate	revision
ISO 29701:2010 Nanotechnologies - Endotoxin test on nanomaterial samples for in vitro systems - Limulus amoebocyte lysate (LAL) test	published
IEC/CD TS 62607-2-1 Nanomanufacturing - Key control characteristics for CNT film applications - Resistivity	on-going project
IEC/TS 62622:2012 Artificial gratings used in nanotechnology - Description and measurement of dimensional quality parameters	published
ISO/TS 80004-1:2010 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 1: Core terms	published
IEC/NP TS 80004-2 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 2: Nano-objects: Nanoparticle, nanofibre and nanoplate	on-going project
ISO/TS 80004-3:2010 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 3: Carbon nano-objects	published
ISO/TS 80004-4:2011 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 4: Nanostructured materials	published
ISO/TS 80004-5:2011 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 5: Nano/bio interface	published
ISO/DTS 80004-6 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 6: Nanoscale measurement and instrumentation	on-going project
ISO/TS 80004-7:2011 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 7: Diagnostics and therapeutics for healthcare	published
ISO/DTS 80004-8 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 8: Nanomanufacturing processes	on-going project
ISO/AWI TS 80004-9 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 9: Nano-enabled electrotechnical products and systems	on-going project
ISO/AWI TS 80004-10 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 10: Nano-enabled photonic components and systems	on-going project
ISO/WD TS 80004-11 Nanotechnologies - Vocabulary - Part 11: Nanolayer, nanocoating, nanofilm, and related terms	on-going project

Source : ISO TC229, www.iso.org.

Le bâtiment et les travaux publics

Martine Reynier, INRS

Définition

Le secteur économique du bâtiment et des travaux publics, ou BTP, regroupe toutes les activités de conception et de construction des bâtiments publics ou privés, industriels ou non, et des infrastructures telles que les routes ou les canalisations. En 2012, l'Organisme professionnel de prévention de la branche BTP (OPPBT) comptait 221 800 entreprises adhérentes, dont la plupart sont des artisans et des TPE : 185 646 ont moins de 10 salariés, 34 823 entre 10 à 99 salariés et 1 331 plus de 100 salariés. Le BTP emploie en France 1,5 million de salariés, dont plus de 117 000 intérimaires et 265 000 travailleurs indépendants. De nombreux métiers sont associés à ce secteur d'activité très fragmenté.

Historiquement, le BTP est considéré comme peu orienté vers la recherche : alors qu'il contribuait en 2010 à 11 % du produit intérieur brut du pays, il ne représentait que 0,3 % des dépenses de recherche et développement (0,1 % pour le bâtiment et 0,5 % pour les travaux publics) pour une moyenne de 2,4 %. C'est un des freins à l'innovation identifiés dans le cadre des suites à donner au Grenelle de l'environnement et au Plan Bâtiment qui en découle. Les efforts de recherche dans l'industrie du BTP visent d'abord à limiter les émissions de CO₂ dans la production du ciment, à construire de bâtiments plus performants sur le plan énergétique, avec des matériaux plus durables. Le BTP bénéficie par ailleurs des avancées acquises dans d'autres secteurs qui l'approvisionnent en matériaux ou produits (industrie du verre, des peintures, vernis, colles, produits d'isolation, plasturgie, etc.).

Indicateurs pertinents

- Nombre de brevets pour des applications dans le secteur de la construction.
- Quantité de substances à l'état nanoparticulaire déclarées dans R-Nano (usage Bâtiment et travaux de construction).

Rétrospective

Les connaissances sur les applications des nanomatériaux dans le BTP, leur disponibilité et leurs performances sont aujourd'hui limitées. Dans le premier bilan établi fin 2013 des déclarations de substances à l'état nanoparticulaire (base de données R-nano), l'usage Bâtiment et travaux de construction est mentionné pour 1,4 % des déclarations (soit environ 39 déclarations sur 2 776).

À partir des informations collectées dans la littérature scientifique et technique et sur internet, les applications semblent se concentrer dans les domaines des matériaux de construction à base de ciment et des revêtements de surface améliorant les fonctionnalités des matériaux.

Silice amorphe synthétique

Les fumées de silice entrent depuis plus de 25 ans dans la formulation des bétons hautes performances (BHP) pour accroître leur fluidité, leur résistance mécanique, en particulier leur résistance à la compression, mais également diminuer leur perméabilité. Les BHP sont utilisés pour des ouvrages soumis à de fortes sollicitations mécaniques (bâtiments de grande hauteur, ponts, réservoirs, centrales nucléaires, etc.), pour des travaux en milieu agressif (milieu marin par exemple) ou encore lorsque le béton doit être pompé sur une grande hauteur. Les fumées de silice sont incorporées à raison de 5 à 10 % en masse dans les ciments/bétons, en entreprises ou sur les chantiers. Elles entrent également dans la formulation de mortiers de réparation et de bétons projetés.

Une autre application de la silice nanométrique dans la construction des routes est proposée par un fabricant allemand : l'introduction du nanomatériau dans une dispersion à base de ciment améliore la résistance au gel du revêtement routier.

L'aérogel de silice est présenté comme un isolant thermique de nouvelle génération, trois fois plus efficace que la laine de verre. Déjà commercialisé sous plusieurs formes, son coût exorbitant par rapport aux isolants traditionnels freine son développement industriel.

Dioxyde de titane

L'emploi du dioxyde de titane nanométrique (anatase) dans le BTP est plus récent, il est lié à ses propriétés photocatalytiques qui accélèrent la décomposition des polluants organiques déposés sur les structures et rendent la surface hydrophile. Cette application permet de préserver l'aspect des bâtiments et de minimiser leur entretien. Elle est également proposée pour améliorer la qualité de l'air aux abords des voies de circulation. L'incorporation du dioxyde de titane peut être réalisée dans la masse (1 % en masse dans le ciment) ou par recouvrement d'une surface par un enduit chargé en dioxyde de titane. Sa mise en œuvre se fait majoritairement au cours de la fabrication de matériaux finis ou semi-finis préfabriqués sur sites industriels : béton architectonique pour façade auto-nettoyante, mur anti-bruit, pavés, tuiles, couverture de toiture bitumineuse. Selon une enquête réalisée en 2012 par l'INRS, les quantités de dioxyde de titane consommées en France dans le BTP, quelques centaines de tonnes, témoignent d'une consommation encore modeste. Le nombre de salariés potentiellement exposés dans le secteur du gros œuvre du bâtiment et du génie civil a été évalué à moins de 100 personnes. Cependant l'enquête conclut que ce marché présente un important potentiel de développement.

Le dioxyde de titane est également utilisé dans la production de vitrages auto-nettoyants. Le verre est recouvert d'une fine couche contenant du dioxyde de titane déposée généralement lors de sa fabrication, mais cette application est également proposée pour des traitements sur site.

Des revêtements « anti-germes » contenant du dioxyde de titane nanométrique sont proposés pour recouvrir les surfaces intérieures des bâtiments, notamment dans le secteur médical. Cette application reste marginale.

Autres nanomatériaux

D'autres nanomatériaux sont apparus depuis peu sur le marché de la construction, tels que la nanoargile (ajoutée au ciment, elle augmente la fluidité du mélange et diminue le temps de prise) ou le nano-silicate de lithium en solution (appliqué sur les sols en béton, il permet d'obtenir une surface moins poreuse et plus résistante).

En raison de leurs propriétés physiques exceptionnelles, les nanotubes de carbone ont été proposés comme le matériau idéal de renforcement des bétons. Les études réalisées à ce jour n'ont pas atteint les résultats escomptés et cette application, confrontée à des obstacles de coût et d'incertitudes sanitaires, n'est pas encore développée. Diverses particules sont également à l'étude, toujours dans le but d'augmenter la résistance du béton : nano-alumine, nano-calcaire, nanotubes inorganiques, etc.

Prospective

Le BTP est l'un des domaines où les nanomatériaux sont déjà utilisés en tant qu'additifs dans les matériaux de structure (béton, asphalte, verre, plastiques...) ou dans les revêtements. Des quantités significatives de silice amorphe synthétique et dans une moindre mesure, de dioxyde de titane sont déjà présentes dans ce secteur. Le coût actuel des nanotechnologies, leur caractère fondamentalement *high tech* et le peu d'applications pratiques déjà disponibles ne facilitent pas l'ouverture vers les changements. Toutefois, les nanotechnologies pourraient ouvrir de nouvelles perspectives dans la construction des bâtiments et des infrastructures routières : amélioration de la résistance des matériaux, de l'isolation, de la sécurité des structures et des impacts environnementaux et énergétiques.

En plus de la capacité d'innovation et de recherche du BTP et des secteurs connexes, d'autres facteurs viennent impacter le développement des nanotechnologies dans ce secteur :

- le prix de revient doit baisser : les matériaux de construction sont généralement utilisés en très grande quantité et une petite différence dans le prix peut entraîner une forte augmentation des coûts de construction ;
- le BTP utilise souvent des matières premières disponibles localement qui peuvent s'avérer incompatibles avec les procédés intégrant des nanomatériaux ;
- la performance technique et la durabilité des matériaux et des produits sur le long terme doivent être démontrées ; de nombreuses normes et spécifications techniques obligatoires encadrant le marché de la construction sont susceptibles d'entraver les innovations ;
- la mise en œuvre des procédés utilisant des nanomatériaux peut s'avérer plus délicate que celle des matériaux traditionnels, nécessitant alors de faire appel à des travailleurs spécialisés ayant reçu une formation ;

- l'absence d'information sur les risques pour la santé et l'environnement suscite une méfiance vis-à-vis des nanomatériaux encore plus grande dans ce secteur qui connaît un grand nombre de maladies professionnelles liées à l'amiante ;
- l'environnement réglementaire et sociétal, en particulier l'acceptabilité des consommateurs vis-à-vis des produits intégrant des nanomatériaux, doit être favorable.

Hypothèses

Hypothèse 1. Quelques innovations et une utilisation marginale

Les efforts de recherche et développement du BTP restent stables. Les nouvelles utilisations dans ce secteur sont marginales pour différentes raisons : coût, risques, etc.

Hypothèse 2. Poursuite du déploiement dans certaines applications

Le BTP investit dans des activités émergentes de haute technologie. Des retombées importantes rendent possibles l'utilisation de nanomatériaux pour certaines applications, qui se développent sans révolution et de manière responsable.

Hypothèse 3. Développement intensif des nanomatériaux dans la construction

Des avancées technologiques se produisent, notamment en France et de nombreux procédés ou produits intégrant des nanomatériaux envahissent le marché avec des applications multiples et des coûts abordables. Le BTP bénéficie de ces innovations et les nanomatériaux se retrouvent dans tous les secteurs de la construction.

Références

- F.A. van Broekhuizen, J.C. van Broekhuizen. Nano-products in the European Construction industry - State of the art 2009. Novembre 2009.
- Nanomanufacturing - emergence and implications for U.S. competitiveness, the environment, and human health. Highlights of a forum convened by the United States Government Accountability Office, janvier 2014, GAO-14-181SP.
- B. Honnert, G. Mater - Utilisation du dioxyde de titane nanométrique. Cas particulier de la filière BTP. INRS, Hygiène et sécurité du travail, 2012, ND 2367-229-12.
- Nano in the construction industry. NanoTrust-Dossier n° 032, août 2012 : pub.oeaw.ac.at/ita/nanotruster-dossiers/dossier032en.pdf
- M. J. Hanus, A. T. Harris. Nanotechnology innovations for the construction. Progress in materials science 58 (2013) 1056-1102.

La chimie et la plasturgie

Cécile Ollic-Tissier, Carsat Alsace-Moselle

Définition

L'industrie chimique couvre une large gamme de produits et d'activités qui se déclinent de l'amont vers l'aval. Ce secteur regroupe entre autres la pétrochimie, la chimie phytosanitaire, l'industrie pharmaceutique, la fabrication de polymères, et de peintures ainsi que l'oléochimie. L'industrie chimique fabrique à la fois des produits chimiques de base, des produits chimiques intermédiaires et des produits finis. L'industrie chimique en France - 7^e producteur mondial et 2^e européen - est un acteur majeur de l'économie française. Elle regroupe 3 350 entreprises dont 94 % de TPE¹/PME² et emploie 155 740 salariés directs et près de 500 000 emplois indirects.

Plasturgie

Au niveau mondial en 2008, la France se situe au septième rang pour la production des plastiques (avec 4,7 % des parts de marché), les deux premiers étant l'Allemagne (avec 14,1 % des parts de marché) et la Chine (avec 11 %). Composée essentiellement de PME, l'industrie de la plasturgie est très diversifiée en termes de marchés et de technologies.

L'avenir de la chimie dépend d'un grand nombre de facteurs :

- coût des matières premières,
- coût de l'énergie / hausse des prix de l'énergie et de matières premières,
- raréfaction du pétrole,
- exploitation du gaz de schiste outre-Atlantique,
- pression de la réglementation en matière de santé et d'environnement / montée des préoccupations environnementales,

¹ Très petites entreprises.

² Petites et moyennes entreprises.

- mondialisation avec notamment montée des acteurs émergents en Asie et au Moyen-Orient.

Mais il dépend aussi des choix des acteurs et notamment de leur volontarisme en matière d'investissement dans la recherche et de leurs capacités à anticiper les compétences de demain. Son avenir réside dans l'investissement dans la recherche et dans l'innovation.

Plasturgie

Face aux groupes chimiques internationaux, fournisseurs de matières premières, les entreprises de la transformation de matières premières n'ont pas la taille suffisante pour négocier les prix d'achat.

L'industrie de la plasturgie est directement touchée par le manque de stabilité des cours des matières premières. Elle subit, en amont, les pressions des grands groupes chimiques internationaux et connaît également une forte pression en aval des donneurs d'ordres de l'automobile et de l'agro-alimentaire.

Les petites entreprises industrielles de moins de 20 salariés sont très nombreuses dans l'industrie de la plasturgie. Cette atomisation des structures industrielles rend l'accès aux marchés extérieurs difficiles.

Rétrospective

L'histoire de la chimie industrielle est faite de grandes découvertes scientifiques qui ont, par la suite, favorisé la création d'applications technologiques. De tous les secteurs industriels, c'est la chimie qui consacre le plus d'argent à la R&D. On constate cependant depuis 10 ans une stagnation des budgets de recherche. Néanmoins, la recherche et l'innovation demeurent une condition de la performance du secteur. Les industries chimiques doivent aujourd'hui faire face à une série de défis considérables.

Les enjeux de l'industrie chimique sont clairement définis par les besoins des industries en aval et notamment celle qui occupent les places de leaders sur le marché (transports, énergie, bâtiments...). De plus, les industries chimiques sont fortement tributaires des matières premières qu'elles utilisent pour donner vie, après transformation, à des produits de consommation. L'augmentation actuelle des matières premières est problématique pour la filière. Pour pallier cette flambée des prix les industriels de la branche cherchent des alternatives, dans un contexte économique difficile.

Propice au développement des activités de R&D, la crise peut se traduire par le changement de paradigme de la filière face aux grands secteurs industriels. C'est pourquoi, une des tendances fortes cible le développement des nanomatériaux.

La production de nanomatériaux représente l'une des voies de développement et de compétitivité des industriels de la chimie en France, au service de l'ensemble des secteurs industriels (automobile, bâtiment, cosmétique, pharmacie, textile...). Une compétition internationale forte est déjà engagée dans le développement de ces technologies qui représentent un enjeu majeur pour la compétitivité des industries françaises et européennes. Ce développement des nanomatériaux dans l'industrie

chimique devra également faire face à la méfiance, voire le combat, de populations qui sont autant effrayées par les risques environnementaux et sanitaires que par les conséquences économiques.

Les nanomatériaux et les nanotechnologies font partie des domaines d'excellence de la France. Le tissu industriel français dispose d'une réelle capacité de réaction grâce à un savoir-faire et des compétences avancés, notamment dans les nanomatériaux. On note également le dynamisme et la capacité du tissu industriel de la chimie à se remettre en cause et maintenir le cap par le biais de la diversification et de l'innovation. En effet, les PME ont maintenu leurs efforts d'enrichissement technologique, notamment dans les nanomatériaux.

Plasturgie

L'innovation a permis au matériau plastique d'acquérir des qualités très appréciées sur de nombreux marchés : automobile, emballage, bâtiment, industrie électrique et électronique ainsi que dans l'aéronautique, le spatial ou le médico-chirurgical. L'évolution technologique est permanente et progressive.

Prospective

La filière des industries chimiques doit aujourd'hui faire face à de nouveaux défis liés à l'environnement mondial, aux évolutions de la réglementation et au contexte économique. Loin d'être un handicap, ils offrent des opportunités d'amélioration des procédés et de l'image du secteur.

Malgré un contexte européen difficile, l'industrie chimique en France devrait enregistrer une légère croissance en 2013. L'UIC (Union des industries chimiques) anticipe ainsi une légère progression de la production chimique de 0,5 % en 2013, suivie d'une croissance supérieure à 1 % en 2014.

L'enjeu des nanotechnologies est stratégique pour permettre à la France de conserver un positionnement phare dans la mise au point de matériaux innovants. Cependant les nanomatériaux ne se développeront qu'à la condition d'en maîtriser les risques

Tout en intégrant le contexte industriel et environnemental associé au secteur des nanomatériaux, c'est la prise en compte des paramètres éco-conceptuels qui, à fonctionnalité égale, favorisera l'intégrabilité des nanomatériaux dans les produits industriels, mettant parfois en avant des problématiques de gestion de fin de vie.

Se pose cependant la stratégie à adopter vis-à-vis de l'intégration des nanomatériaux dans les industries chimiques. Deux grandes voies :

- la diversification : une approche incrémentale de l'innovation. L'approche sectorielle est-elle adéquate contextuellement et techniquement ?
- l'écoute marché : une ouverture à l'innovation de rupture. Le savoir-faire actuel permet-il une approche à moyen et long terme des marchés d'avenir ?

Plasturgie

Face à cette mondialisation croissante des échanges, l'innovation est au cœur de la stratégie des plasturgistes pour assurer le maintien de leurs parts de marché.

Les fournisseurs de matières plastiques de base innovent pour répondre aux besoins des clients des secteurs automobiles, aéronautique, des équipements électriques et électroniques, des sports et loisirs ou du secteur médical, mais aussi des secteurs cosmétiques ou du bâtiment avec lesquels ils coopèrent pour mieux satisfaire leurs attentes. L'utilisation croissante de nanomatériaux permet de mieux répondre aux besoins des clients.

En plein essor et dans un souci d'innovation permanent, la plasturgie se mobilise chaque jour pour adapter les matériaux de demain : éco-conception, plastiques intelligents, matériaux écologiques, etc.

Hypothèses

Hypothèse 1. Déclin du secteur d'activité en France

Pas de déploiement des nanomatériaux dans l'industrie chimique/dans la plasturgie.

Le secteur n'est plus compétitif en France :

- soit à cause de réglementations spécifiques,
Exemple : des adaptations au règlement REACH³ sont réalisées afin de prendre en compte les nanomatériaux et leur évaluation en matière de sécurité. De par cette nouvelle réglementation, les industries chimiques européennes freinent les investissements dans le domaine des nanomatériaux.
- soit à cause de la hausse des coûts de l'énergie, la chimie se rapproche alors des sources d'énergie.
Exemple : l'abondance de gaz provoquée outre-Atlantique par l'exploitation massive du gaz de schiste bouleverse la donne. Elle fait durablement chuter le prix du gaz américain. Ce renversement est à l'origine d'un impressionnant réveil de l'industrie chimique américaine. A la cadence des nouveaux projets aux États-Unis répond en écho celle des fermetures en Europe de la part d'acteurs étrangers comme européens. Les entreprises n'investissent pas dans la recherche et développement, et n'intègrent pas de nanomatériaux dans leurs *process*.

Hypothèse 2. Déploiement dans certains secteurs d'activités : marchés de niches, produits à hautes valeurs ajoutées

Afin de conserver leur avantage concurrentiel, certains groupes chimiques investissent massivement dans de nouveaux pans de l'industrie chimique, tels que les nanotechnologies. Les investissements sont réorientés vers des produits où la valeur

³ Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des produits chimiques.

ajoutée est plus forte et la concurrence moins violente. On assiste à une douce pénétration du savoir et du savoir-faire dans le domaine des nanomatériaux.

Exemple : Le développement des produits autonettoyants, des équipements sportifs haut de gamme...

Hypothèse 3. Déploiement massif dans tous secteurs confondus

Le développement des nanomatériaux est en croissance et repose sur l'innovation qui a pour objectif une dissémination large de la technologie ou du procédé. Les solutions qui en découlent s'adaptent aux procédés industriels ainsi qu'aux exigences et contraintes réglementaires.

On assiste à une maîtrise du savoir-faire industriel et des nouvelles technologies de pointe dans les nanomatériaux.

Pour l'industrie chimique, les nanomatériaux s'inscrivent dans la continuité des travaux innovants menés pour développer des produits performants sur les plans technique et énergétique tout en améliorant la maîtrise des risques sanitaires et environnementaux. Ils permettent de fabriquer des produits manufacturés innovants tout en consommant moins d'énergie.

Références

www.uic.fr

www.observatoireindustriechimiques.com

<http://www.dgcis.gouv.fr>

L'emballage

Cécile Ollic-Tissier, Carsat Alsace-Moselle

Définition

Un emballage est un objet destiné à contenir et à protéger des marchandises, à permettre leur manutention et leur acheminement du producteur au consommateur ou à l'utilisateur, et à assurer leur présentation, leur conservation ou transport. L'emballage joue également un rôle important dans l'information légale et commerciale du consommateur.

La production d'emballage est une activité économique de premier plan : de façon générale, on évalue que rien que dans l'agroalimentaire, elle constitue 2 % du PNB¹ des pays développés. Elle consomme principalement du plastique, du carton et leurs dérivés.

En France, l'emballage est le 8^e secteur industriel (SESSI 2004), autant que l'aéronautique. L'industrie de l'emballage comprend en 2006 un ensemble de 850 entreprises de 20 salariés ou plus, employant 110 000 personnes.

C'est une filière hétérogène, mêlant des industries de main-d'œuvre à la structure atomisée comme celles du plastique et du bois, et des secteurs beaucoup plus capitalistiques et concentrés comme l'industrie du verre.

La sécurité et l'hygiène alimentaire, l'information du consommateur, le design et le respect de l'environnement constituent des enjeux d'importance pour cette industrie innovante et dynamique.

Le prix des matières premières crée les conditions favorables pour chercher des alternatives : les industriels travaillent sur l'utilisation de nouvelles matières premières qui devront offrir les mêmes qualités à des prix compétitifs. Les efforts d'innovation en la matière sont importants.

¹ Produit national brut.

Rétrospective

Si des grands groupes, leaders mondiaux, tiennent une place prépondérante dans les segments nécessitant de forts investissements, la capacité d'évolution et d'adaptation des petites entreprises contribue largement à la compétitivité de ce secteur où la proximité des clients et des fabricants joue un rôle important.

Largement tournée vers l'agroalimentaire, l'industrie de l'emballage opère également dans l'ensemble de l'industrie et notamment dans les secteurs de la pharmacie et des cosmétiques. Cette industrie tient une place essentielle dans la chaîne de fabrication qui relie le produit brut au consommateur final.

L'industrie agroalimentaire est la première consommatrice d'emballages, avec 66 % du chiffre d'affaires de l'industrie de l'emballage. Elle est également celle qui est la plus confrontée à des exigences réglementaires et ce à tous les stades de la chaîne de production jusqu'à la consommation des produits.

Les emballages alimentaires actuels doivent contribuer à la préservation de la salubrité et des propriétés organoleptiques et nutritionnelles du produit emballé, à la prolongation de la durée de vie des aliments, à la protection de l'environnement, à l'accroissement de la rentabilité, au confort d'utilisation et à la différenciation. À cet égard, le secteur de l'emballage alimentaire est un secteur dynamique où l'innovation est un vecteur incontournable du développement.

Les nanotechnologies figurent parmi les progrès technologiques les plus prometteurs car elles offrent de nouvelles solutions en matière d'emballage alimentaire pouvant profiter à la fois aux consommateurs et à l'industrie. Les grandes compagnies du secteur agroalimentaire mènent déjà des projets de recherche sur l'utilisation des nanotechnologies dans l'emballage et certaines applications sont déjà offertes sur le marché. Actuellement, on estime qu'entre 400 et 500 nanoproduits d'emballages sont commercialisés.

Prospective

Les emballages, qui ont pour débouché essentiel le secteur agroalimentaire, se caractérisent par un contenu en innovation de plus en plus important. Leurs fonctionnalités vont désormais bien au-delà des finalités principales consistant à contenir, transporter et stocker des produits. On assiste ainsi, depuis plusieurs années, au développement des emballages actifs – qui changent les conditions du produit pour améliorer sa durée de vie – et des emballages intelligents – qui contrôlent les conditions de transport et de stockage.

Les fonctionnalités recherchées pour les emballages actifs et intelligents doivent désormais permettre ou garantir :

- une éco-conception (poids, résistance physique),
- une régulation microbienne / la conservation des aliments (emballages antimicrobiens),
- un contrôle qualité (indicateur de fraîcheur, détection de micro-organismes pathogènes),

- une traçabilité et une meilleure gestion des stocks (étiquette RFID),
- une sécurité alimentaire, une protection des marques et une authenticité des produits (nano-impression).

Actuellement, les tendances majeures en termes de recherche et développement de nouveaux emballages sont orientées vers :

- une amélioration des propriétés des emballages pour augmenter la durée de vie des produits (revêtement intérieur à effet « barrière »),
- une amélioration des propriétés mécaniques et thermiques des emballages,
- une incorporation des fonctions antibactériennes et anti-oxydantes,
- la création d'emballages interactifs,
- la création de nouvelles propriétés fonctionnelles (revêtement, enrobage, détecteurs, encre intelligente...),
- la fabrication de capteurs intelligents imprimés et d'indicateurs pour les emballages flexibles.

Un des axes de développement repose également sur les emballages intelligents nano-imprimés :

- nano-capteurs pour la détection :
 - de pathogènes et de contaminants dans l'aliment,
 - de protéines allergéniques pour prévenir les réactions dues aux aliments,
- indicateur de fraîcheur à l'échelle nanométrique,
- nanoparticules pour encres intelligentes : mettre en évidence si l'atmosphère modifiée reste intact dans l'emballage au cours de la chaîne de distribution,
- nano-codes-barres pour le suivi et la traçabilité : amélioration de la sécurité des emballages pour sécuriser la marque et l'authenticité du produit (faible coût de fabrication et de mise en œuvre, excellente compatibilité et durabilité, contrefaçon difficile).

Dans la prochaine décennie, on prévoit que les nanotechnologies seront utilisées dans la fabrication de 25 % de tous les emballages alimentaires.

Hypothèses

Hypothèse I. Les emballages sont réduits au maximum et simplifiés (sans utilisation de nanomatériaux)

Le coût des matières premières et de l'énergie demeure très élevé. On assiste à une tendance écologique forte au niveau de la population. Les industriels doivent compter avec un consommateur de plus en plus attentif à l'environnement et faire face au recul de la demande d'emballage (développement des emballages recyclables).

Hypothèse 2. Développement limité des emballages intelligents et actifs (avec utilisation de nanomatériaux) dans certains secteurs pour augmenter par exemple la traçabilité

La nano-impression intelligente influence grandement le secteur de l'emballage car elle répond parfaitement à la stratégie de sécurité, de protection des marques et de garantie de l'authenticité des produits développée par l'industrie agroalimentaire.

Les industriels du secteur de l'impression des produits de l'emballage innovent et développent de nouveaux procédés à base de nanomatériaux. Ce développement reste néanmoins limité à la sécurité des produits alimentaires.

Hypothèse 3. Développement intensif, optimisation des emballages grâce aux nanomatériaux

Ce développement s'inscrit dans un contexte social empreint de scandales sanitaires (exemples : Spanghero, intoxications alimentaires graves...) conduisant à la nécessité d'améliorer la traçabilité des filières agroalimentaires. Les capteurs à l'échelle nanométrique semblent s'imposer comme une des applications privilégiées pour la sécurité alimentaire et la mesure de la qualité.

Les emballages prolongeant la durée de vie des produits, ou donnant l'alerte en cas d'altération des denrées deviennent réalité avec le développement des emballages dits actifs et intelligents.

Pour assurer la sécurité et la qualité des aliments, les consommateurs sont prêts à payer davantage. C'est une opportunité pour les industriels, en particulier pour les professionnels du secteur de l'emballage.

Grâce à l'évolution des technologies de *smart packaging*, ceux-ci sont en effet en mesure de proposer des conditionnements sophistiqués, capables de fournir une information en temps réel sur le niveau de fraîcheur de leur contenu ou encore de participer activement à l'allongement de sa durée de conservation. Les emballages contribuent donc, en lien avec la demande du consommateur, à allonger la durée de vie du produit, à en assurer une meilleure traçabilité et à lui fournir une protection renforcée (via des systèmes antimicrobiens notamment).

Références

<http://www.ctcpa.org>

<http://www.industrie-techno.com>

<http://www.industrie.gouv.fr/sessi>

<http://www.france-emballage.org>

La santé et la pharmacie

Michaël Koller, Suva, et Myriam Ricaud, INRS

Définition

Cette variable couvre l'ensemble des domaines d'utilisation et d'application des nanomatériaux et des nanotechnologies dans le secteur médical. Le terme de nanomédecine peut également être utilisé pour désigner cette variable. Les nanomatériaux et nanotechnologies peuvent être utilisés à des fins de diagnostic, de monitoring ou de traitement, que ce soit en tant que médicament ou en tant que dispositif médical, sans qu'il y ait de frontière stricte entre ces deux aspects.

Le marché mondial de la nanomédecine, estimé à 63,8 milliards en 2010, pourrait atteindre de 100 à 130 milliards d'ici à 2016, selon les estimations du cabinet Bionest. « *En France, la nanomédecine a pris un bon départ, fondé sur une recherche académique solide, répartie sur l'ensemble du territoire* », observe Claude Allary, consultant de Bionest. Deux pôles majeurs se détachent toutefois : Grenoble, avec le CEA Leti et l'université Joseph-Fourier, et l'Île-de-France, avec l'université Paris-Sud, l'ENS Cachan... C'est autour de ces deux pôles que sont implantées la majorité des PME¹, comme Fluoptics (imagerie in vivo), Axialys (vectorisation), Cytoo (tests cellulaires), Fluigent (microfluidique), BioAlliance (médicaments nanoparticulaires), Nanobiotix (radiothérapie), etc. La jeunesse de cette industrie et son caractère particulièrement innovant expliquent qu'il n'y ait pas encore de grands acteurs, mais la France compte aujourd'hui une trentaine d'entreprises industrielles spécialisées ou recourant à des technologies de nanomédecine. Convaincue de l'intérêt d'aider une filière industrielle à émerger, la Banque publique d'investissement a soutenu la création du consortium NICE (Nano innovation for cancer) dont la société BioAlliance est le chef de file avec comme autres partenaires les entreprises Nanobiotix, le CEA Leti et l'Institut Galien (université Paris-Sud). Son objectif est la construction d'une plate-forme destinée à accélérer le développement et l'industrialisation des nanomédicaments en France en capitalisant sur l'expertise des partenaires. En raison de la rareté du capital-risque dans le domaine de la santé, une structure publique va ainsi, pour la première fois, financer des essais cliniques.

¹ Petites et moyennes entreprises.

Les acteurs français du secteur voient aussi tout l'intérêt de la dimension européenne. Ils ont joué un rôle moteur dans la création, en 2005, de la plateforme technologique européenne de nanomédecine, car certains équipements, nécessaires pour faire passer la production à l'échelle industrielle, comme un laboratoire de caractérisation et une unité de production pilote, ne peuvent être rentabilisés qu'à l'échelle européenne.

Rétrospective

La nanomédecine en est à ses débuts, mais connaît un développement extrêmement rapide, comme tous les domaines des nanotechnologies. Le champ de la recherche ne cesse de s'étendre, les publications se multiplient et les possibilités d'application sont de plus en plus nombreuses. Cependant, la plupart d'entre elles sont encore au stade de la recherche. Les études portent, d'une part, sur les techniques applicables à des principes actifs et, d'autre part, sur les outils diagnostiques. L'importance des nanotechnologies pour le domaine médical tient au fait que bon nombre de processus biologiques interviennent à l'échelle nanométrique. On présentera dans ce qui suit les principaux domaines de recherche et d'application des nanomatériaux et nanotechnologies dans le secteur médical.

Vecteurs, systèmes de délivrance de médicaments

Les nanomatériaux peuvent aider à transporter des médicaments de façon ciblée dans l'organisme (vectorisation). Entourant le médicament, ils le protègent du contact avec le système immunitaire et empêchent sa dégradation. Il s'agit de systèmes colloïdaux tels que des liposomes, micelles, fullerènes, nanotubes de carbone, nanoparticules de polymères (polyéthylène glycol, notamment), produits de conjugaison d'un polymère et d'un principe actif, etc. L'objectif est que les médicaments ainsi transportés n'exercent leur action qu'au point visé, ce qui réduit les effets secondaires. Les vecteurs peuvent être biodégradables, solubles, non solubles ou lentement solubles. Les nanovecteurs peuvent être modifiés de telle sorte qu'ils puissent franchir les barrières biologiques (la barrière hémato-encéphalique, par exemple). Sont également développés des nanosystèmes (dispositifs ou robots) permettant l'identification et le traitement ciblés des cellules malades.

Principes actifs

Des nanomatériaux sont utilisés comme principes actifs. C'est le cas par exemple des dendrimères à structure arborescente, qui présentent à leur surface des groupes fonctionnels spécifiques exerçant une action bien définie. Les principes actifs au sens large peuvent aussi être des nanomatériaux qui, en raison de certaines de leurs caractéristiques physiques, exercent un effet thérapeutique ; ainsi, dans les procédés par hyperthermie utilisés dans le traitement du cancer, des nanoparticules métalliques chauffées sous l'action de rayonnements électromagnétiques sont utilisées pour tuer les cellules cancéreuses. L'utilisation de nanomatériaux permet de cibler la destruction des tissus et de limiter ainsi les effets à la tumeur.

Diagnostic

Diverses techniques, telles que la microscopie à balayage à effet tunnel ou la microscopie à force atomique, permettent d'observer les nanostructures. La nano-imagerie permet, grâce à l'utilisation de nanomatériaux tels que les nanotubes de carbones ou les fullerènes, de réduire les quantités de produit de contraste utilisées (le gadolinium, par exemple). Dans le domaine de la biologie médicale, les nanotechnologies permettent de réaliser sur des quantités de plus en plus faibles de liquide biologique un nombre croissant d'analyses (Lab-on-a-Chip). Une multitude de systèmes de mesure basés sur les nanotechnologies (capteurs cantilever et SPR, et autres biopuces et biocapteurs) sont également développés. Dans le domaine du diabète, des appareils d'analyse de l'haleine des patients sont ainsi mis au point. Enfin, pour le diagnostic *in vitro*, des nanomatériaux peuvent être utilisés comme marqueurs des molécules biologiques.

Biomatériaux et dispositifs médicaux

Les nanomatériaux sont utilisés dans le traitement de surface de dispositifs implantables tels que les stents coronaires, les pacemakers ou les prothèses articulaires afin de faciliter leur acceptation par l'organisme et d'éviter un rejet. Le traitement de surface des stents coronaires doit permettre plus précisément d'éviter les resténoses et les thromboses. Autres exemples de traitement de surface par des nanomatériaux, l'utilisation de revêtements à base de nanoparticules d'argent comme germicides dans les pansements, les textiles médicaux et autres dispositifs (cathéters par exemple). Des nanomatériaux sont également utilisés pour réaliser des ciments proches du tissu osseux, censés présenter des propriétés mécaniques optimisées, ou des amalgames dentaires (hydroxyapatite). Dans le domaine de la dialyse, des filtres à nanopores sont destinés à être utilisés dans des appareils de dialyse ou des reins artificiels. Autre implant en cours de développement, la prothèse rétinienne nanoélectronique.

Contrairement à la médecine humaine, les nanotechnologies sont encore peu utilisées en médecine vétérinaire, mais les potentialités de marché sont réelles.

Prospective

Déterminants de l'évolution future de la variable

- Les applications actuelles et prévisibles des nanomatériaux et des nanotechnologies dans le secteur médical.
- Les effets à long terme (souhaités ou indésirables).
- Les dispositions réglementaires et l'acceptabilité du risque.
- La structure démographique.
- Les coûts.
- La compétitivité de la production française.

Comme beaucoup d'autres domaines des nanotechnologies, la nanomédecine en est à ses débuts. Les applications potentielles sont multiples. Les nanotechnologies offrent des possibilités d'améliorer les thérapies actuelles et de développer des démarches thérapeutiques inédites. Cela vaut notamment pour le cancer, les maladies cardiovasculaires

et les maladies neurodégénératives. Dans ses *Recommandations relatives à l'évaluation toxicologique des médicaments sous forme nanoparticulaire*, l'ANSM² indique que l'on peut prévoir un développement spectaculaire. Dans une société occidentale vieillissante, le besoin de traitements médicaux est une constante, et il est peu probable que la tendance s'inverse. Cependant, outre le besoin de nouvelles formes de thérapie, l'aspect coûts joue également un rôle croissant. Le secteur de la santé connaît une véritable explosion des coûts dans bon nombre de pays occidentaux ; les nanotechnologies étant relativement onéreuses, la question est de savoir si leurs applications médicales contribueront à une réduction des coûts, grâce à une amélioration des thérapies et de la prévention.

La caractérisation toxicologique d'un nanomatériau porte tout d'abord sur les propriétés physico-chimiques qui influent directement sur son comportement toxicologique. Il s'agit notamment de la composition, de la forme, de la tendance à l'agrégation ou à l'agglomération, de la solubilité, de la structure et de la charge surfacique, de la biopersistance, des mécanismes de dégradation et d'excrétion, etc. Doivent par ailleurs être évaluées les interactions du nanomatériau avec l'organisme ; ainsi, les propriétés physico-chimiques déterminant l'agrégation peuvent différer, dans le sérum, des propriétés observées lors de tests *in vitro*, ou l'adsorption de protéines à la surface d'un nanomatériau peut influencer sur la distribution dans l'organisme et la réponse des cellules. Doivent également être caractérisées la toxicocinétique et la toxicodynamique (compte tenu notamment de la voie d'absorption, de la taille de l'objet et de sa surface), la distribution, l'élimination et la biodégradation, la cyto- et la génotoxicité, le risque de sensibilisation, la cancérogénicité, l'hémocompatibilité, la reprotoxicité, etc. Un risque d'effet chronique doit être envisagé (bien qu'il n'existe à ce jour que peu d'études probantes) lorsqu'un nanomatériau n'est pas dégradé ou éliminé, mais qu'il est biopersistant et tend à s'accumuler. Il faut dire d'une façon générale que l'on sait encore peu de choses sur la toxicité chez l'homme.

Un facteur important pour le développement de la nanomédecine est le comportement toxicologique des nanomatériaux mis en œuvre. Les incertitudes sont nombreuses à cet égard, en particulier pour ce qui est de leur efficacité à long terme et de leurs effets à long terme chez l'homme. Les nanomatériaux présentent une telle hétérogénéité qu'il n'est pas possible d'en évaluer les risques à titre général. Il est souvent difficile d'établir dans quelle mesure les données des études *in vitro* ou *in silico* et celles issues de l'expérimentation animale peuvent être extrapolées à l'homme. Il n'est guère possible, à ce jour, d'apporter une réponse générale à cette question, chaque nanomatériau devant faire l'objet d'une caractérisation toxicologique spécifique. De plus, les données toxicologiques établies par des études portent pour la plupart sur les nanomatériaux purs, et non sur les produits pharmaceutiques ou les dispositifs médicaux ; il importe d'évaluer avec le plus grand soin dans quelle mesure ces données sont transposables à ces produits et dispositifs.

Outre la toxicité inhérente aux nanomatériaux, il faut également tenir compte, dans l'évaluation des risques, des effets provenant de substances nocives de l'environnement ou d'impuretés dans la fabrication, et ce d'autant plus que la plupart des études de nanotoxicologie publiées ne portent pas sur un dispositif médical ou un médicament, mais sur le nanomatériau lui-même, et ne sont donc pas directement transposables.

Des exemples de risques potentiels débattus entre experts sont par exemple l'induction de processus de croissance dans les tissus mous, dans le cas de matériaux dotés d'un revêtement de surface ; le déclenchement de processus inflammatoires par des nanotubes de carbone ou des fullerènes ; la présence de particules provenant de l'abrasion de la surface de prothèses (cobalt-chrome ou dioxyde de titane) ; la sensibilisation aux composés de l'argent du fait de l'utilisation fréquente de revêtements à base de nanoparticules d'argent, etc.

² Agence nationale de sécurité du médicament.

Pour pouvoir comparer le potentiel de danger de plusieurs matériaux utilisés en nanomédecine (si tant est que cela soit possible, compte tenu de leur hétérogénéité), une démarche uniforme d'évaluation toxicologique est indispensable, et il convient d'œuvrer à l'élaboration de critères standards. La reproductibilité des résultats doit être assurée non seulement au sein d'un même laboratoire, mais aussi entre laboratoires. Il faut pour cela disposer de méthodes d'essai communes et validées. C'est une condition sine qua non pour assurer la cohérence des analyses de risques au niveau international.

Un problème qu'il ne faut pas sous-estimer, dans l'évaluation des risques, est l'augmentation exponentielle du nombre de publications dans le domaine des nanotechnologies. Il devient difficile d'en avoir un aperçu complet, de s'assurer de leur qualité et de faire le tri entre les résultats selon leur degré de pertinence. Il serait souhaitable qu'il y ait éventuellement moins de publications, mais d'un niveau qualitatif plus constant.

La recherche médicale est fortement réglementée. Il existe d'innombrables directives, normes et codes nationaux ou internationaux. Les contrôles sont stricts. Les études cliniques portent sur l'efficacité, mais aussi sur les effets indésirables, ce qui permet d'évaluer les dangers d'un produit nouveau. Pour qu'un produit soit remboursé par les caisses d'assurance maladie, ce n'est pas seulement l'efficacité, mais aussi l'utilité et le rapport coût-bénéfice qui doivent être établis. Cependant, on ne tient pas compte, dans ce processus, de l'effet à long terme, cet aspect intervenant dans la phase qui suit la mise sur le marché. Dans l'ensemble, les dispositions réglementaires permettent de limiter le risque dans une certaine mesure. Pour les autorités, il n'est pas facile de trouver le juste équilibre en matière de réglementation sans imposer trop d'obstacles à la recherche.

Incertitudes

- Moyens financiers pour la recherche.
- Résultats de la recherche.
- Passage à l'application (dont moyens financiers).

Tendance lourde

La demande de moyens thérapeutiques et diagnostiques reste constante dans un contexte de vieillissement démographique croissant.

Hypothèses

Hypothèse I. L'industrie française est compétitive

Les nanotechnologies (la nanomédecine) occupent, dans ce secteur, une place de plus en plus importante en raison de leurs effets positifs à long terme sur la santé et de leur coût raisonnable. Les budgets alloués à l'innovation en France ne cessent de croître. La recherche est ainsi très dynamique et le passage au stade industriel s'effectue aisément en France. L'industrie française demeure très concurrentielle.

Hypothèse 2. La recherche est effectuée en France mais pas la production

Les nanotechnologies (la nanomédecine) occupent, dans ce secteur, une place de plus en plus importante en raison de leurs effets positifs à long terme sur la santé et de leur coût raisonnable. Les budgets alloués à l'innovation en France ne cessent de croître. La recherche est ainsi très dynamique mais le passage à l'application se fait avec de grandes difficultés en France. L'industrie française ne peut pas résister à la concurrence étrangère. La production est effectuée hors de France.

Hypothèse 3. Ni la recherche ni la production ne sont réalisées en France

Les nanotechnologies (la nanomédecine) occupent, dans ce secteur, une place de plus en plus importante en raison de leurs effets positifs à long terme sur la santé et de leur coût raisonnable. Néanmoins, les budgets alloués à la recherche en France demeurent faibles. Les résultats sont, par ailleurs, peu concluants et ne débouchent pas sur des applications industrielles. La recherche et la production industrielle françaises ne peuvent pas résister à la concurrence étrangère, elles sont effectuées hors de France.

Hypothèse 4. Marché limité à des applications bien spécifiques produites en France

Les nanotechnologies (la nanomédecine) n'occupent qu'une place marginale dans ce secteur en raison de leurs multiples effets négatifs à long terme sur la santé ou d'une réglementation très stricte. Le marché est restreint. Compte tenu de leur spécificité technique, ces applications sont produites en France.

Références

- AFSSAPS, Évaluation biologique des dispositifs médicaux contenant des nanomatériaux. Rapport scientifique. Février 2011.
- AFSSAPS, Recommandations relatives à l'évaluation toxicologique des médicaments sous forme nanoparticulaire. Version 2 du 4 octobre 2011.
- Applications des nanotechnologies à la médecine. Compétitivité et attractivité de la nanomédecine Horizon 2025, décembre 2013 : <http://www.leem.org/applications-des-nanotechnologies-medecine>
- Grobe Antje, Schneider Christian, Reki Mersad, Schetula Viola: Nanomedizin - Chancen und Risiken. Friedrich-Ebert-Stiftung. September 2008.
- Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung: Nanomedizin. Innovationspotenziale in Hessen für Medizintechnik und Pharmazeutische Industrie. 2. aktualisierte Auflage, Oktober 2008.
- Hunziker Patrick: Nanomedizin. Anwendungsmöglichkeiten der Nanowissenschaften in Diagnostik und Therapie. BioFokus Nr. 78. September 2008.

La cosmétique

Myriam Ricaud, INRS

Définition

On entend par cosmétique tout produit destiné à être mis en contact avec les parties superficielles du corps humain (épiderme, système capillaire, ongles, lèvres, dents, etc.), en vue de les nettoyer, de les parfumer, d'en modifier l'aspect, de les protéger, de les maintenir en bon état ou de corriger les odeurs corporelles (article L. 5131-1 du Code de la santé publique). Cette définition recouvre de très nombreux produits de la vie quotidienne : hygiène, santé, apparence, bien être, etc. Les produits destinés à être ingérés, inhalés, injectés ou implantés dans le corps humain ne sont pas considérés comme des produits cosmétiques.

L'industrie cosmétique figure parmi les rares secteurs où la France demeure le leader mondial, avec 25 % des parts de marché. Ces performances se confirment surtout à l'exportation, l'industrie cosmétique est ainsi le 3^{ème} secteur de l'économie française par son solde commercial net. Elle est composée à 80 % de PME et compte 450 sites sur le territoire (fabrication ou recherche) répartis dans 74 départements. Elle représente 54 000 emplois directs et 25 000 emplois indirects¹. L'innovation est un élément clé de son développement : la troisième entreprise française en termes de nombre de brevets déposés chaque année appartient à l'industrie cosmétique.

Le marché mondial des cosmétiques est estimé à plus de 425 milliards d'euros². Le principal foyer de consommation en 2011 était l'Europe, avec 72 milliards d'euros, puis les États-Unis avec 37,8 milliards d'euros et enfin le Japon avec 29,3 milliards d'euros. Ces marchés sont néanmoins arrivés à maturité avec des taux de croissance annuels plafonnant à 2 %, alors que la demande s'accroît dans les pays émergents (Brésil, Russie, Inde, Mexique et Chine) qui enregistrent des taux de croissance oscillant entre 5 % et 9 %.

¹ <http://www.redressement-productif.gouv.fr/semaine-industrie/activites-industrielles/beaute-cosmetique>.

² Euromonitor International, 2009.

Les nanomatériaux sont utilisés par l'industrie cosmétique depuis plusieurs dizaines d'années en tant que colorants, filtres ultra-violet, conservateurs, agents antibactériens, etc. Outre les nanomatériaux, des nano-émulsions et des nano-capsules sont également mises en œuvre dans l'industrie cosmétique.

Rétrospective et situation actuelle

Les applications

Dans l'industrie cosmétique, le plus connu et le plus utilisé des nanomatériaux est actuellement le dioxyde de titane. Ce filtre minéral est connu pour sa capacité à réfléchir, disperser et absorber les rayons ultra-violet. Il est utilisé, en raison de cette propriété, dans les produits de protection solaire sous la forme nanométrique depuis approximativement 20 ans (ainsi que dans les crèmes et produits de soin). Le dioxyde de titane est également employé comme pigment dans les colorations et décolorations capillaires, les dentifrices et le maquillage ainsi que comme agent antibactérien dans les déodorants et les équipements de soin (brosse à cheveux, rasoir électrique, fer à friser, etc.).

De nombreux autres nanomatériaux sont également employés dans une pléthore d'applications cosmétiques :

- les oxydes de fer sont utilisés comme pigments dans les colorations et décolorations capillaires ainsi que dans le maquillage (mascara, vernis à ongles, fard à paupières, etc.) ;
- les silices amorphes sont utilisées comme abrasifs, agents opacifiants et épaississants dans les colorations et décolorations capillaires, les crèmes et autres produits de soin (démaquillant, exfoliant, etc.), les dentifrices ainsi que comme agent de matité dans le maquillage ;
- l'argent est employé comme agent antibactérien dans les crèmes et produits de soin, dans les dentifrices, les déodorants, les équipements de soin et les shampooings et savons ;
- l'argile est utilisée comme agent de matité dans les crèmes et autres produits de soin ainsi que dans le maquillage ;
- l'oxyde de zinc est employé comme filtre UV dans les crèmes de soin, les crèmes de protection solaire et le maquillage ;
- le carbonate de calcium est utilisé comme abrasif et agent épaississant dans les dentifrices et comme agent opacifiant dans le maquillage ;
- le noir de carbone est employé comme pigment dans le maquillage, tout comme l'oxyde d'aluminium ;
- l'oxyde de cérium est employé comme filtre UV dans les crèmes de protection solaire ;
- les fullerènes ainsi que l'or sont utilisés dans les crèmes de soin en raison de leurs propriétés antioxydantes ;
- etc.

Des nanocapsules et des dendrimères sont également mis en œuvre dans les crèmes et autres produits de soin.

Le Wilson Center aux États-Unis réalise depuis 2005 un inventaire³ des produits de consommation contenant des nanomatériaux commercialisés à travers le monde. À ce jour, 168 cosmétiques ou produits de soin contenant des nanomatériaux ou des nano-émulsions sont répertoriés dont 29 produits cosmétiques français commercialisés par 6 entreprises (sachant que seulement 33 produits français contenant des nanomatériaux sont recensés dans l'ensemble de la base de données). En 2005, 31 produits cosmétiques contenant des nanomatériaux ou des nano-émulsions commercialisés à travers le monde étaient identifiés. Selon cette base de données, qui est non exhaustive, le nombre de cosmétiques ou de produits de soin contenant des nanomatériaux commercialisés à travers le monde a donc été multiplié par un peu plus de 5 en 9 ans.

Dans le premier bilan établi fin 2013 par le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie⁴ des déclarations des « substances à l'état nanoparticulaire » mises sur le marché en France en 2012 est indiqué que 6,1 % des usages déclarés des nanomatériaux produits, distribués ou importés concernent les cosmétiques et les produits de soin (soit environ 170 déclarations sur 2 776). Malgré un pourcentage qui peut sembler faible, les cosmétiques et produits de soin se classent à la quatrième position des usages déclarés juste derrière les peintures et les revêtements.

La réglementation

Il n'existe pas d'autorisation préalable de mise sur le marché pour les produits cosmétiques. L'exigence prévue par les textes est l'absence de nocivité pour la santé. Il incombe aux fabricants de garantir que leurs produits satisfont aux exigences législatives, réglementaires et ne présentent aucun danger pour la santé. Le fabricant doit ainsi constituer un dossier technique, tenu à disposition des autorités de contrôle, dans lequel figure la formule qualitative et quantitative du produit, la description des conditions de fabrication et de contrôle ainsi que l'évaluation de la sécurité pour la santé humaine du produit fini. L'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM) encadre en France l'évaluation de la qualité et de la sécurité d'emploi des produits cosmétiques.

Le Règlement Cosmétiques⁵, voté le 24 mars 2009 au Parlement européen, introduit une définition du terme « nanomatériau » (différente de celle préconisée par la Commission européenne en octobre 2011) : « un nanomatériau est un matériau non soluble ou bio-persistant, fabriqué intentionnellement et se caractérisant par une ou plusieurs dimensions externes ou par une structure interne, sur une échelle de 1 à 100 nm ». Il impose également à toute entreprise qui souhaite commercialiser un produit contenant des nanomatériaux, d'en informer, six mois avant la mise sur le marché, la Commission européenne. En cas de doute, cette dernière pourra requérir

³ <http://www.nanotechproject.org/cpi>.

⁴ Éléments issus des déclarations des substances à l'état nanoparticulaire, novembre 2013 : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_public_format_final_20131125.pdf.

⁵ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:342:0059:0209:fr:PDF>.

l'avis du Comité scientifique pour la sécurité des consommateurs (SCCS). De plus, l'entreprise doit indiquer, depuis le 1^{er} juillet 2013, la présence de nanomatériaux dans la liste des ingrédients qui figure déjà obligatoirement sur tous les produits. Une règle d'étiquetage a été prévue à cet effet : nom de l'ingrédient [nano]. L'industrie cosmétique fait ainsi partie des premiers secteurs économiques à se doter d'un encadrement spécifique des nanomatériaux.

Si les produits finis cosmétiques doivent répondre aux exigences du Règlement Cosmétiques, les ingrédients utilisés dans leur formulation entrent dans le champ d'application du Règlement européen REACH⁶. Concrètement, les ingrédients cosmétiques produits ou importés en quantité supérieure à 1 tonne par an en Europe sont soumis à un enregistrement dans le cadre de ce règlement.

L'industrie cosmétique est également concernée par le dispositif de déclaration annuelle des « substances à l'état nanoparticulaire », entrée en vigueur en France au 1^{er} janvier 2013 (articles L. 523-1 à L. 523-3 du Code de l'environnement). Cette déclaration concerne les fabricants, les importateurs et les distributeurs de « substances à l'état nanoparticulaire » mises sur le marché en France, et est obligatoire au-delà de 100 grammes par an et par substance. Elle comporte l'identité du déclarant, la quantité, les propriétés physico-chimiques et les usages de ces substances ainsi que les noms des utilisateurs professionnels. De même, toutes les informations disponibles relatives aux dangers de ces substances et aux expositions auxquelles elles sont susceptibles de conduire, ou utiles à l'évaluation des risques pour la santé et l'environnement, doivent être transmises à la demande des autorités administratives.

Les dangers pour la santé et l'acceptabilité sociale

Les produits cosmétiques contenant des nanomatériaux suscitent de nombreuses interrogations et craintes de la part de la communauté scientifique, des pouvoirs publics, des organisations non gouvernementales ainsi que de la population générale vis-à-vis des dangers potentiels qu'ils représentent pour la santé humaine. Un exemple, les Amis de la Terre australiens⁷ mentionnent dans un rapport paru en juillet 2012 la nécessité d'une réglementation spécifique pour les nanomatériaux contenus dans les produits de protection solaire.

Parmi ces interrogations, le passage percutané des nanomatériaux manufacturés insolubles est l'une des plus discutées.

De nombreuses recherches (menées pour certaines dans le cadre de projets européens tels que Nanoderm⁸) ont été entreprises sur la pénétration percutanée de divers nanomatériaux et notamment des nanoparticules de dioxyde de titane et d'oxyde de zinc. Ces travaux ont été conduits sur plusieurs modèles in vivo et in vitro, après

⁶ Registration, evaluation, authorisation of chemicals.

⁷ <http://nano.foe.org.au/sites/default/files/Nano-ingredients%20in%20sunscreens%202012.pdf>.

⁸ <http://www.uni-leipzig.de/~nanoderm>.

administration unique ou répétée, sur peau saine ou altérée, et par des acteurs aussi différents que des industriels, des équipes de recherche académiques et des agences gouvernementales.

La plupart de ces études semblent indiquer que la pénétration percutanée des nanomatériaux insolubles tels que le dioxyde de titane est peu probable sauf dans le cas où la peau est endommagée. Les données sur le sujet sont cependant parfois contradictoires et ne permettent pas d'exclure formellement tout risque de passage transcutané. En effet, outre le fait que de nombreux paramètres sont susceptibles d'influencer la pénétration des particules à travers la peau (taille, élasticité et propriétés de surface des particules, état de la peau, contraintes mécaniques, présence de sueur, etc.), les études ont souvent été réalisées sur des temps courts avec des nanomatériaux pas ou peu caractérisés en termes de taille, forme cristalline, enrobage, etc. De plus, certaines études n'utilisent pas de protocoles standardisés et validés selon les recommandations du Comité scientifique pour la sécurité des consommateurs (SCCS) ou de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE).

Ces conclusions sont reprises dans de nombreux rapports de synthèse comme celui de l'Agence de la protection de l'environnement danoise⁹ publié en 2013 ou celui de l'Afssaps (devenue ANSM) paru en 2011. Début 2008, l'Afssaps avait en effet été saisie par la Direction générale de la santé (DGS) sur les nanomatériaux dans les produits cosmétiques, afin de se prononcer sur le risque de pénétration cutanée, de génotoxicité et de cancérogenèse induit par l'utilisation du dioxyde de titane et de l'oxyde de zinc. L'Afssaps a conclu que le manque d'études pertinentes et représentatives des nanomatériaux réellement utilisés dans les produits cosmétiques ne permet pas de conclure sur l'innocuité de ces matériaux dans les produits cosmétiques.

Cette saisine de l'Afssaps faisait suite à l'évaluation réalisée par le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) en 2006, publiée en 2010¹⁰, conduisant au classement du dioxyde de titane, quelle que soit sa granulométrie, dans le groupe 2B des agents possiblement cancérogènes pour l'homme en raison de preuves suffisantes issues de l'expérimentation animale et de données inadéquates dans l'espèce humaine. Un effet cancérogène a effectivement été constaté chez les rats exposés par inhalation à des doses élevées de dioxyde de titane nanométrique.

Après avoir établi un guide portant sur l'évaluation des risques des nanomatériaux dans les cosmétiques, le SCCS a également rendu des avis sur les principaux ingrédients nanométriques utilisés en cosmétique. Le SCCS reconnaît que des lacunes subsistent sur le comportement biologique des nanomatériaux. Néanmoins, au vu des données disponibles, en particulier l'absence d'éléments en faveur d'une pénétration percutanée, le SCCS considère que l'utilisation du dioxyde de titane et de l'oxyde de zinc nanométriques, à des concentrations pouvant aller jusqu'à 25 % comme filtre ultra-violet dans les crèmes solaires, n'induit *a priori* pas de risque pour la santé, après application sur une peau saine. Il en est de même du noir de carbone employé comme colorant jusqu'à 10 % dans les cosmétiques. Le SCCS précise que l'enrobage des nanomatériaux peut modifier sensiblement leur comportement.

⁹ <http://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2013/09/978-87-93026-50-6.pdf>

¹⁰ <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol93/mono93.pdf>

Prospective

Les possibilités d'utilisation des nanomatériaux dans les cosmétiques et produits de soin semblent multiples et variées. Les nanomatériaux pourraient permettre d'améliorer les performances des cosmétiques existants et de développer des produits inédits.

Or, dans un contexte de vieillissement démographique accru et de culte de la jeunesse, la demande en cosmétiques et produits de soin toujours plus innovants, élaborés et efficaces ne peut être que croissante.

Cependant, un facteur limitant l'utilisation des nanomatériaux dans les cosmétiques et produits de soin demeure le comportement toxicologique de ces derniers. Les incertitudes sont nombreuses à cet égard, en particulier pour ce qui est de leurs effets à long terme chez l'homme. Il est souvent difficile d'établir dans quelle mesure les données issues des études *in vitro* ou *in silico* et celles issues de l'expérimentation animale peuvent être extrapolées à l'homme. Les nanomatériaux présentent une telle hétérogénéité qu'il n'est guère possible, à ce jour, d'apporter une réponse générale à cette question, chaque nanomatériau devant faire l'objet d'une caractérisation toxicologique spécifique. De plus, les données toxicologiques établies par des études portent, pour la plupart, sur les nanomatériaux seuls, et non sur les produits cosmétiques ; il importe d'évaluer avec le plus grand soin dans quelle mesure ces données sont transposables à ces produits.

Par ailleurs, les connaissances scientifiques disponibles sur la pénétration percutanée des nanomatériaux manufacturés insolubles demeurent contradictoires et ne permettent donc pas d'exclure formellement tout risque de passage.

Un autre frein au développement des nanomatériaux manufacturés dans l'industrie cosmétique, directement lié au précédent, est la confiance des consommateurs en ces nouveaux produits tant du point de vue de leur innocuité que de leur efficacité.

Dans ce contexte, le dioxyde de titane va faire l'objet à partir de 2015 d'une évaluation dans le cadre du règlement européen REACh. Cette évaluation, confiée à la France (et plus précisément à l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), vise à déterminer si sa fabrication et son utilisation peuvent constituer un risque pour la santé humaine et l'environnement. Ce processus spécifique d'évaluation est généralement initié suite à des inquiétudes fondées sur les risques potentiels d'une substance chimique. Si, après examen des données disponibles, l'État membre évaluateur, en l'occurrence la France, estime que la fabrication et/ou l'utilisation du dioxyde de titane présente un risque, il peut alors compléter l'évaluation par :

- une proposition de classification et d'étiquetage harmonisés pour les effets cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction, les sensibilisants respiratoires ou autres effets,
- une proposition visant à identifier le dioxyde de titane en tant que substance extrêmement préoccupante (SVHC),
- une proposition visant à restreindre la fabrication ou l'utilisation du dioxyde de titane,

- des actions ne relevant pas du règlement REACH, telle qu'une proposition de valeur limite d'exposition professionnelle à l'échelle européenne.

Hypothèses

Hypothèse 1. Développement de quelques produits cosmétiques haut de gamme incorporant des nanomatériaux en France

Dans une société vieillissante où le jeunisme fait loi, la demande en cosmétiques et produits de soin est croissante, les investissements en recherche et développement concernant l'utilisation de nanomatériaux en France sont ciblés (en raison de coûts élevés), quelques produits haut de gamme incorporant des nanomatériaux manufacturés sont mis au point et commercialisés en quantité limitée, l'industrie cosmétique française assoit sa suprématie dans le domaine des cosmétiques de luxe.

Hypothèse 2. Développement très limité de produits cosmétiques incorporant des nanomatériaux en France

Dans une société vieillissante où le jeunisme fait loi, la demande en cosmétiques et produits de soin est croissante, les investissements en recherche et développement concernant l'utilisation de nanomatériaux en France sont très limités, l'industrie cosmétique se tourne vers le développement de produits cosmétiques naturels et peu de produits incorporant des nanomatériaux manufacturés sont commercialisés, l'industrie cosmétique française demeure malgré tout concurrentielle.

Hypothèse 3. Développement d'une large gamme de produits cosmétiques incorporant des nanomatériaux en France

Dans une société vieillissante où le jeunisme fait loi, la demande en cosmétiques et produits de soin est croissante, les investissements en recherche et développement en France sont substantiels, de nombreux produits innovants incorporant ou pas des nanomatériaux manufacturés sont mis au point et commercialisés, l'industrie cosmétique française demeure parmi les leaders mondiaux.

L'agroalimentaire

Éric Gaffet, Institut Jean Lamour

Définition

Cette fiche traite de la conception, de la production et de la mise en œuvre des nanomatériaux dans le domaine de l'agroalimentaire.

Cette fiche comprend à la fois les usages des nanomatériaux dans les denrées alimentaires (par exemple comme auxiliaire technologique), mais également dans les emballages alimentaires (par exemple comme agent biochimique actif).

Rétrospective

Un marché en très fort développement au niveau mondial

Un document récemment publié par les Amis de la Terre présente une revue très exhaustive des applications des nanotechnologies/nanomatériaux dans le domaine des industries de l'agroalimentaire¹.

Le nombre de denrées ou d'emballages alimentaires incorporant des nanomatériaux devrait, selon cette étude, croître rapidement. En effet, sur la base de travaux réalisés par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'Organisation mondiale de la santé (World Health Organisation, WHO), l'alimentation s'appuiera de plus en plus sur des produits issus des nanotechnologies². C'est ainsi que les économistes estiment que d'ici 2015, 40 % de toutes les entreprises de l'industrie

¹ "Way too little - Our government's failure to regulate nanomaterials in food and agriculture" May 2014, Friends of the Earth, http://nano.foe.org.au/sites/default/files/FOE_nanotech_food_report_low_res.pdf (consulté le 30 Mai 2014)

² FAO/WHO (2010) Expert meeting on the application of nanotechnology in the food and agriculture sectors: potential food safety implications, http://whqlibdoc.who.int/publications/2010/97892415_63932_eng.pdf

agroalimentaire utiliseront des nanotechnologies, les marchés asiatiques étant en première ligne, suivis par les États-Unis³.

Au niveau mondial, beaucoup de grandes entreprises agroalimentaires, notamment Heinz, Nestlé, Unilever et Kraft, explorent les nanotechnologies pour la production d'aliments et d'emballages, comme détaillé dans le tableau I. Selon Les Amis de la Terre - Australie, des entreprises agrochimiques et semencières développent également des programmes de recherche et de développement dans le secteur des nanotechnologies.

<ul style="list-style-type: none"> • Altria (Kraft Foods) • Associated British Foods • Ajinomoto • BASA • Cadbury Schweppes • Campbell Soup • Dupon Food Industry Solutions • General Mills • Glaxo-SmithKline • Goodman Fielder • Groupe Danone • John Lust Group Plc • H.J. Heinz 	<ul style="list-style-type: none"> • Hershey Foods • La Doria • Maruha • McCain Foods • Mars • Nestlé • Northern Food • Nicherei • Nippon Suisan Kaisha • PepsiCo • Sarah Lee • Unilever • United Foods
--	--

Tableau I. Liste d'entreprises du secteur agroalimentaire développant des programmes de recherche et développement dans le domaine des nanotechnologies⁴.

Utilisation des nanomatériaux dans les denrées alimentaires

Nanomatériaux comme auxiliaires technologiques

Silice amorphe synthétique

Mises en œuvre le plus couramment comme auxiliaires technologiques, les nanoparticules de silice amorphe synthétique (E551) sont ajoutées aux aliments sous forme de poudres (par exemple dans le sel, la poudre de lactosérum, la poudre d'œuf, la poudre de boisson instantanée (café en poudre), les mélanges d'assaisonnement (piment, ail en poudre, etc.), le sucre en poudre, la soupe en poudre⁵, etc.).

La silice amorphe synthétique est utilisée comme agent antiagglomérant, épaississant ou encore comme support de saveurs. Les consommateurs y sont donc exposés sur une base quotidienne.

³ LGL Bayern (Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit) (2012) Nanomaterialien in Lebensmitteln und Verbraucherprodukten. Anwendungsbereiche, Analytik, rechtliche Rahmenbedingungen, http://www.lgl.bayern.de/publikationen/doc/nanomaterialien_lebensmittel_produkte.pdf

⁴ Kraft position on nanotechnology <http://www.kraftfoodsgroup.com/DeliciousWorld/food-safety-quality/nanotech.aspx>

⁵ "Evonik, Selective Studies on Fumed Silica" <http://nano.evonik.com/sites/nanotechnology/en/responsibility/safety-research/studies-on-fumed-silica/pages/default.aspx>

Les noms commerciaux des nanoparticules de silice amorphe destinées à être utilisées dans les aliments sont Aerosil 200F et Aerosil 380F⁶ de Evonik.

Dioxyde de titane

Le dioxyde de titane (E171) est un additif courant dans de nombreux produits alimentaires. Il est notamment utilisé pour blanchir et éclaircir les confiseries, le fromage et les sauces.

Une étude datant de 2012 portant sur l'introduction de dioxyde de titane sous forme particulaire, a calculé qu'environ 36 % des particules de dioxyde de titane utilisées dans les aliments étaient sous forme de nanoparticules⁷. L'étude a révélé la présence de particules de dioxyde de titane dans une grande variété d'aliments, y compris des beignets, des sucettes, des chewing-gums et des chocolats. Les quantités ainsi détectées pouvaient atteindre des valeurs relativement importantes (figure 1).

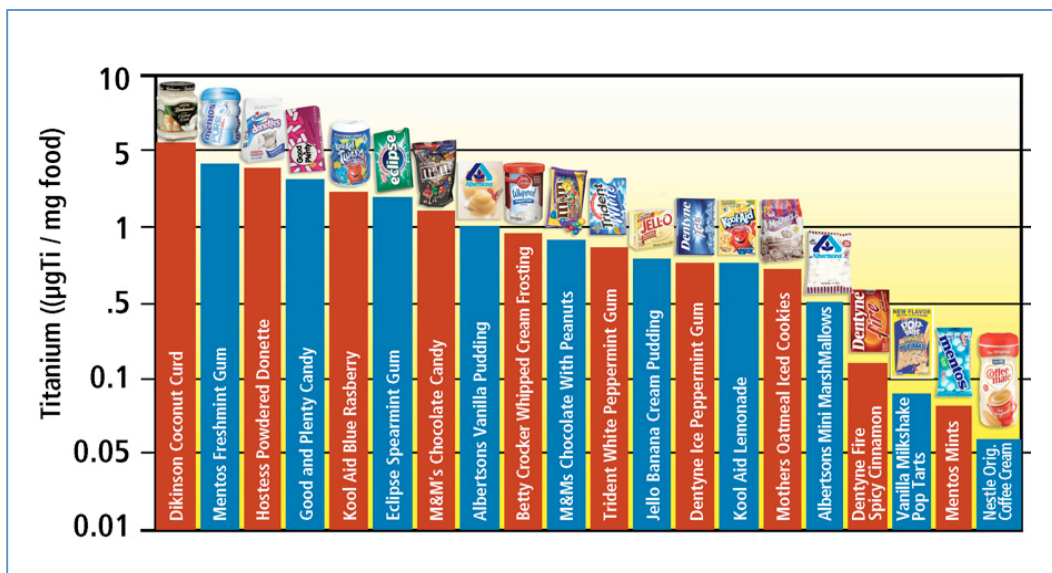


Figure 1. Teneur en titane (microgramme Ti / milligramme masse alimentaire)⁸.

Des tests entrepris par les Amis de la Terre - États-Unis en 2013 ont également constaté la présence de nanoparticules de dioxyde de titane sur des échantillons de poires, de poivrons et de pommes fraîches.

Une étude menée par As You Sow, publiée en 2013, a également détecté la présence de nanoparticules de dioxyde de titane⁹ dans des composés alimentaires, notamment dans des donuts.

⁶ "Presence and risks of nanosilica in food products", Dekkers S, Krystek P, Peters RJ, Lankveld DX, Bokkers BG, van Hoeven-Arentzen PH, Bouwmeester H, Oomen A.G. *Nanotoxicology*, 5 (2011), pp 393-405

⁷ "Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products", Alex Weir, Paul Westerhoff, Lars Fabricius, Kiril Hristovski and Natalie von Goet, *Environmental Science and Technology* 46 (2012), pp 2242-2250

⁸ <http://grist.org/food/nanoparticles-in-your-food-youre-already-eating-them/>

⁹ "Slipping Through the Cracks: An Issue Brief on Nanomaterials in Food" – As You Sow – Fév. 2013, http://www.asyousow.org/ay_s_report/slipping-through-the-cracks/ (consulté le 30 mai 2014)

Des nanoparticules d'argent sont également utilisées dans de nombreux produits alimentaires comme auxiliaires technologiques^{10,11}.

Aliments fonctionnels

L'industrie alimentaire investit dans le développement d'aliments dits fonctionnels qui devraient par exemple contribuer à :

- renforcer le système immunitaire,
- améliorer la digestion,
- modifier le taux de cholestérol.

Des vitamines, des minéraux (comme le fer, le magnésium ou le zinc), des probiotiques, des peptides bioactifs, des antioxydants, etc. sont ainsi ajoutés dans des produits laitiers, des céréales, du pain et des boissons. Certaines de ces substances sont sous forme de nanoparticules. Le marché mondial des aliments fonctionnels en 2005 était d'environ US \$ 73,5 milliards¹². La croissance de ce marché est de 4 % par an, beaucoup plus rapide que celui des aliments dits classiques. Entre 2003 et 2010, le marché pour ces produits a plus que doublé¹³. Quelques aliments fonctionnels contenant des nanomatériaux sont déjà sur le marché, par exemple des yaourts et des boissons contenant du platine ou de l'or nanocolloïdal¹⁴.

Emballages agroalimentaires

Emballages classiques

L'une des premières applications commerciales des nanotechnologies et des nanomatériaux dans le secteur agroalimentaire est l'emballage (ou encore packaging)^{15,16}. Les emballages mettant en œuvre des nanomatériaux sont de trois types : les emballages barrières, les emballages antimicrobiens et les capteurs. Entre 400 et 500 emballages contenant des nanomatériaux seraient ainsi commercialisés actuellement à travers le monde (25 % de l'ensemble des emballages alimentaires devraient contenir des

¹⁰ http://www.sciencedaily.com/releases/2013/08/130822194530.htm?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+sciencedaily%2Ftop_news%2Ftop_science+%28ScienceDaily%3A+Top+News+-+Top+Science%29

¹¹ "Detection of engineered silver nanoparticle contamination in pears", Zhang Z, Kong F, Vardhanabhuti B, Mustapha A, Lin M. J Agric Food Chem. ; 60 (43) (2012 Oct 31), pp 10762-7. doi: 10.1021/jf303423q. Epub 2012 Oct 19

¹² "Out of the Laboratory and onto our Plates: nanotechnology in food and agriculture", Miller, G. & Senjen, R. (2008) Friends of the Earth Australia, p. 13
http://www.foeurope.org/activities/nanotechnology/Documents/Nano_food_report.pdf

¹³ Leatherhead Food Research (2011) Long may the growth in functional foods continue,
<http://www.leatherheadfood.com/long-may-the-growth-in-functional-foods-continue>

¹⁴ "Zusatzstoffe, Aromen und Enzyme in der Lebensmittelindustrie", Bundesministerium für Gesundheit Österreich (2010),
http://bmg.gv.at/cms/home/attachments/7/1/6/CH1250/CMS1288096887525/druckversion_zusatzstoffpaket_neu_30072010.pdf

¹⁵ "Most companies will have to wait years for nanotech's benefits" - Foodproductiondaily.com , Roach S. (2006) "21 August 2006
<http://www.foodproductiondaily.com/news/ng.asp?id=69974>

¹⁶ "Expert meeting on the application of nanotechnologies in the food and agriculture sectors: potential food safety implications", FAO/WHO (2010)
http://whqlibdoc.who.int/publications/2010/9789241563932_eng.pdf, p4

nanomatériaux à la fin de la prochaine décennie¹⁷). Selon Visiongain, le marché mondial des emballages contenant des nanomatériaux s'élevait à 20 milliards de dollars en 2013¹⁸. Un des objectifs clés de ces emballages est d'offrir une durée de conservation plus longue aux denrées alimentaires¹⁹.

Emballages ingérables

Une pratique se fait jour dans le domaine des fruits et des légumes, à savoir leur traitement par des nanoparticules soit au cours de leur croissance soit au cours de leur stockage. Il s'agit notamment de la mise en œuvre d'un produit à base d'argile synthétique (la laponite), connu sous le nom commercial Surround. Ce traitement devrait permettre d'accroître le rendement de près de 20 %, de diminuer la quantité de pesticides et d'insecticides utilisée et enfin de supprimer les multi-emballages lors du stockage.

Les revêtements alimentaires contenant des nanomatériaux manufacturés seraient déjà utilisés sur les fruits et les légumes aux États-Unis et au Canada.

Pesticides, insecticides

La silice nanostructurée Supersil, présentant une surface spécifique de plus de 100 m²/g, est typiquement utilisée comme support aux principes actifs de pesticides, fongicides et autres insecticides. Cette nano-silice présente une plus grande absorption, un mouillage facilité, une meilleure compatibilité avec la plupart des substances toxiques et une meilleure stabilité chimique.

La mise en œuvre de ces nanoparticules que ce soit pour support de pesticides, insecticides, fongicides, etc. pourra également se traduire potentiellement par l'exposition des agriculteurs lors des opérations d'épandage des dits produits ainsi que des populations riveraines lors de ces opérations.

Les déterminants de cette variable sont l'acceptabilité sociétale de l'usage des nanomatériaux dans le domaine agroalimentaire

¹⁷ Helmut Kaiser Consultancy Group (2007) Nanopackaging Is Intelligent, Smart And Safe Life. New World Study By Hkc22. Press Release 14.05.07, <http://www.prlog.org/10016688nanopackaging-isintelligent-smart-and-safe-life-newworld-study-by-hkc22-com-beijing-office.pdf>

¹⁸ Global Nano Packaging Market 2013-2023 – Opportunities for Nanotechnology, October 07, 2013 <http://www.prweb.com/releases/2013/10/prweb11202425.htm>

¹⁹ i) "Advanced Nanotechnology gets grant for food packaging" AzoNano (2007). Nanotechnology News Archive, <http://www.azonano.com/news.asp?newsID=3177>

ii) "Securely wrapped: Nanoparticles make Durethan films airtight and glossy"- Research 15:34-37, http://www.research.bayer.com/edition_15/15_polyamides.pdf (accessed 15 December 2007)

iii) "Improved packaging food quality and safety. Part 2" Lagarón J, Cabedo L, Cava D, Feijoo J, Gavara R, Gimenez E. (2005). Nano-composites. Food Additives and Contaminants 22(10): 994-998

iv) "Potential perspectives of bio-nanocomposites for food packaging applications", Sorrentino A, Gorrasi G, Vittoria V. (2007). Trends Food Sci Technol 18:84-95

v) CSIRO, Smart Product Packaging, <http://www.csiro.au/Outcomes/Food-and-Agriculture/Packaging-Overview.aspx> Webpage suggests this coating is commercially available. (accessed 10 March 2014)

vi) "Die Datenlage zur Bewertung der Anwendung der Nanotechnologie in Lebensmitteln und Lebensmittelbedarfsgegenständen ist derzeit noch unzureichend", BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung) (2009), http://www.bfr.bund.de/cm/343/die_datenlage_zur_bewertung_der_anwendung_der_nanotechnologie_in_lebensmitteln.pdf

Hypothèses

Hypothèse 1. Développement tendanciel des nanomatériaux

Les études de toxicité et d'écotoxicité démontrent l'innocuité des nanoproduits mis en jeu, les coûts de fabrication sont faibles et l'utilité démontrée. Par conséquent, la mise en œuvre des nanomatériaux dans l'agroalimentaire se poursuit.

Hypothèse 2. Développement modéré ou ralenti

Les études de toxicité et d'écotoxicité démontrent l'innocuité des nanomatériaux mis en jeu, les coûts de fabrication sont élevés mais l'utilité est démontrée. Par conséquent, la mise en œuvre des nanomatériaux dans l'agroalimentaire devient sélective. Seuls quelques usages sont développés.

Hypothèse 3. Arrêt du développement

Les études de toxicité et d'écotoxicité démontrent un danger avéré des nanomatériaux mis en jeu. Quels que soient les coûts de fabrication et l'utilité des nanoproduits, leur développement dans l'agroalimentaire est arrêté.

L'énergie

Éric Drais, INRS

Définition

Le secteur de l'énergie concerne la production, le transport, la distribution et la consommation de toutes les formes de produits énergétiques, de combustibles ou de chaleur, qu'elles soient d'origine nucléaire, fossile ou renouvelable (Eurostat).

Rétrospective

Au niveau mondial, malgré quelques inflexions dues aux chocs pétroliers ou à la crise économique de 2009, le marché de l'énergie est tendanciellement en forte croissance. Sous l'effet de la croissance démographique et de la croissance économique, tirées principalement par les pays émergents¹, notamment asiatiques (Chine et à moyen terme l'Inde compte tenu de sa démographie), elle pourrait doubler à l'horizon 2050 (Rapport Énergies 2050). Déjà passée de 5,5 à 13,1 milliards de tonnes équivalent pétrole (tep) entre 1971 et 2011 (soit une croissance annuelle moyenne de 2,2 %), la consommation d'énergie pourrait atteindre alors plus de 25 milliards de tonnes équivalent pétrole (Giga tep).

Les énergies fossiles, au premier rang desquelles le pétrole, assurent aujourd'hui encore près de 80 % de l'offre². Cette situation marque la dépendance mondiale aux énergies carbonées et pose la question de sa soutenabilité, tant sur le plan environnemental que sur celui de l'approvisionnement en matières premières. Sur ces plans, l'Europe montre une

¹ Les quatre grands pays émergents, qui constituent les BASIC (Brésil, Afrique du Sud, Inde et Chine), mais aussi ceux du Moyen-Orient, bien plus que les pays OCDE, « feront » demain les marchés de l'énergie et les prix (Rapport Énergies 2050, 2012).

² En 2010, la demande d'énergie primaire mondiale était satisfaite à plus de 80 % par les énergies fossiles. Le pétrole est la première source d'énergie, assurant 33 % des besoins mondiaux, suivi par le charbon (27 %) et le gaz (21 %). Les énergies renouvelables satisfaisaient quant à elles 13 % de la demande, dont 10 % pour l'hydraulique. La part du nucléaire dans la consommation d'énergie primaire s'établissait à 6 %.

dynamique spécifique. Dès les années 1990, elle a pris la tête d'un mouvement de lutte contre le changement climatique. Si sa consommation énergétique reste relativement stable depuis les premiers chocs pétroliers, elle a engagé un ambitieux programme de transition énergétique. Depuis 2008, l'Union européenne (UE) a mis en œuvre le « paquet énergie – climat » qui fixe à 2020 des objectifs contraignants, en particulier les fameux « 20-20-20 » alignés sur le protocole de Kyoto : réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'UE d'au moins 20 % par rapport aux niveaux de 1990 ; porter à au moins 20 % la part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie de l'UE ; réduire de 20 % la consommation d'énergie primaire par rapport aux niveaux prévus, au moyen d'une efficacité énergétique accrue.

Dans ce contexte, bien que soucieuse de son indépendance qui se renforce³, la France n'est pas un « isolat énergétique » (Rapport Énergies 2050). Elle s'inscrit sur des marchés mondiaux tant au niveau des approvisionnements que de la production et participe de la politique européenne avec des objectifs spécifiques. Si sa particularité réside dans la part de l'énergie nucléaire (85 % de la production et 44 % de la consommation d'énergie), à la suite de plans volontaristes⁴, la part d'énergie renouvelable dans la production d'énergie est passée de 9,7 % en 2005 à 13 % en 2013 (18,1 Mtep sur un total de 139)⁵ avec un objectif de 23 % en 2020.

En 2014, la Commission européenne a produit de même une feuille de route « Énergie à 2050 » qui a d'ailleurs renforcé les objectifs à 2030 : réduction des émissions de GES rehaussé à 40 % (80 % en 2050) et développement des énergies renouvelables porté à 27 %. Déjà en 2013, la hausse des moyens de production éoliens et solaires photovoltaïques a fait que les énergies renouvelables ont atteint un niveau comparable au charbon et au nucléaire dans le mix électrique de l'UE à 28 (figure 1).

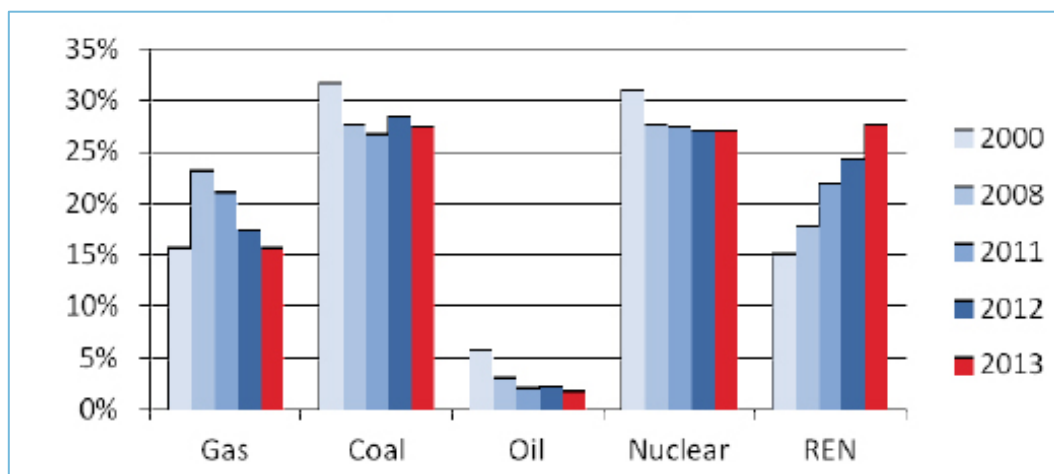


Figure 1. Mix électrique de l'Union européenne

Source : <http://sciences.blogs.liberation.fr>

³ Pour la première fois en 2013, le taux d'indépendance énergétique de la France a dépassé les 50 % avec une production nationale couvrant 53,1 % de la consommation primaire du pays (Commissariat général au développement durable, Chiffres et statistiques, n° 539, juillet 2014).

⁴ Voir encore le dernier projet de loi cours de discussion en 2014 qui fait suite au débat national sur la transition énergétique et au plan national d'action en faveur des énergies renouvelables.

⁵ Commissariat général au développement durable, « Le bilan énergétique de la France en 2013 ». Le point sur, n° 192, juillet 2014.

Au niveau mondial, les énergies renouvelables (EnR ou REN en anglais) fournissent désormais près d'un cinquième de la consommation énergétique et alimentent plus de 22 % de la production électrique, ce qui représente 1.560 gigawatts (GW) (Rapport du réseau REN 21, UN, *Renewable Energy Network for the 21st Century*, juin 2014). Selon ce rapport, les EnR ont représenté, en 2013, plus de 56 % des nouvelles capacités de production d'électricité au niveau mondial. La Chine, les États-Unis, le Brésil, le Canada et l'Allemagne restent aux premiers rangs des pays en matière de capacité installée. L'hydroélectricité a progressé de 4 %, à environ 1000 GW en 2013, soit près d'un tiers de la capacité en électricité renouvelable. Les autres EnR électriques ont ensemble progressé de près de 17 %, à 560 GW, selon les estimations. La puissance installée de photovoltaïque « supplante pour la première fois, celle en éolien », note le rapport. Les nouvelles capacités photovoltaïques ont progressé de plus de 27 % par rapport à 2012, pour atteindre environ 138 GW installés au total. Près d'un tiers sont issus de la Chine. Les capacités éoliennes terrestres représentent désormais plus de 318 GW. « Ce marché a toutefois reculé de près de 10 GW par rapport à 2012, en raison principalement de la forte baisse du marché américain » et de changements dans les politiques publiques de subvention. L'énergie éolienne en mer a en revanche connu « une année record » avec 1,6 GW de nouvelles capacités provenant principalement de l'UE.

Le développement de l'énergie éolienne mais aussi du photovoltaïque posent néanmoins un problème d'intermittence ou de non permanence de la production qui suppose de repenser les solutions techniques de stockage et d'approvisionnement. L'ensemble de ce marché en matière d'EnR et de carburants renouvelables a représenté, à l'échelle mondiale 249,4 milliards de dollars US en 2013.

En France, l'industrie de l'énergie représenterait entre 200 000 et 400 000 emplois (en équivalent temps plein, ETP) soit entre 1 et 2 % de la population active (chiffres 2010) : 127 165 personnes travaillent dans la production, le transport et la distribution d'électricité, 20 705 dans la production, le transport et la distribution de gaz, et 17 611 dans le raffinage (Rapport Énergies 2050, annexe 9, 2012). Dans ces secteurs la France dispose de grandes entreprises en position de leadership international (Areva, EDF, GDF-Suez, Alstom, Total, etc.). Dans la filière renouvelable, selon le rapport de l'Ademe 2010, les emplois s'élèvent à 80 873 ETP. La grande majorité des emplois se trouve en dehors du maillon de la fabrication des équipements. D'après l'Ademe, les emplois se décomposaient comme suit en 2009 : 15 849 dans la fabrication des équipements, 24 195 dans les études et l'installation, 12 683 dans la distribution, et enfin 28 145 dans l'exploitation et la maintenance.

Applications des nanotechnologies à l'énergie

Dans ce secteur porteur⁶, les enjeux des nanomatériaux en matière d'énergie portent surtout sur les économies d'énergie, l'amélioration des performances des systèmes énergétiques et le développement d'énergies renouvelables.

Du point de vue de la sobriété énergétique, les applications des nanotechnologies sont déjà nombreuses : vitrages régulant les échanges thermiques, matériaux nanostructurés contribuant à la diminution de consommation de matières premières et les consommations d'énergie par leur légèreté ou leur rendement, dans les domaines de

⁶ Nouveau moteur de la guerre économique ? IFRI, 2014.

l'électronique, du bâtiment, des travaux publics, des transports, etc. L'utilisation la plus valorisée des nanotechnologies concerne toutefois l'optimisation de la production de ressources énergétiques existantes (pétrole brut, énergie thermique par exemple), l'exploitation de nouvelles sources d'énergie (huiles lourdes, énergie solaire, etc.) et l'amélioration des capacités de transmission et de stockage de l'énergie, en particulier de l'électricité et de l'hydrogène. Plus précisément sur ces points, les applications des nanotechnologies portent sur un éclairage plus économique, le développement de matériaux pour le stockage de l'hydrogène (notamment les nanotubes de carbone), une utilisation en tant que barrière thermique nanostructurée (comme les aérogels), de nouvelles générations de cellules photovoltaïques, des accumulateurs électriques et des cellules de combustion compactes avec de larges surfaces internes, des lasers à puits quantique, etc.

Dans ces domaines, les nations rivalisent en termes de programmes stratégiques. En effet, contrairement à d'autres secteurs exploitant des nanomatériaux traditionnels, il s'agit de renforcer le niveau de maturité pour la commercialisation de ces matériaux ou procédés nouveaux. Les objectifs de programmes nationaux tels que ceux des États-Unis sont ainsi de développer la part de l'énergie solaire et de parvenir dès 2020 à la rendre aussi compétitive en prix de production que les autres formes d'électricité (Sunshot Initiative, US DOE Office). En Europe, le programme de recherche Horizon 2020 fait figurer en bonne place l'appel au développement de nanotechnologies et matériaux avancés pour des technologies énergétiques pauvres en carbone et l'efficacité énergétique (European Commission Decision 4995 of 22 July 2014, p. 24 et suivantes). En France, parmi les travaux les plus aboutis, on retrouve par exemple la production de cellules photovoltaïques multi-jonctions offrant des performances en termes de rendement de l'ordre de 30 à 40 % bien supérieures aux générations précédentes de cellules. Qui plus est, ce niveau de rendement est atteint avec des surfaces actives beaucoup plus réduites.

Quant au stockage énergétique, des applications sont déjà développées. Elles répondent à deux enjeux majeurs : d'une part, renforcer l'autonomie des véhicules électriques et, d'autre part, trouver des solutions aux problèmes d'intermittence posés par les systèmes de production électriques éoliens ou photovoltaïques. Comme d'autres pays, la France élabore ainsi des composants à « super capacité » (combinant densité de puissance et densité d'énergie élevées) pour accroître les niveaux de conversion thermo-électrique ou la récupération d'énergie (exemple au freinage) mais aussi la capacité de recharge rapide et la durée de vie des batteries ou encore favoriser le lissage de production des champs photovoltaïques lors de passages nuageux, etc. Enfin des hydrures métalliques et autres membranes nanostructurées permettent déjà des applications commerciales pour des systèmes de stockage de l'hydrogène sous forme solide (par adsorption) (Rapport décembre 2013).

Pour résumer, de multiples nanomatériaux sont utilisés pour des applications dans le champ de l'énergie. En particulier :

- Les quantum dots (séléniure de cadmium, sulfure de cadmium, etc.) ou les oxydes d'aluminium pour l'éclairage ;
- Le silicium, l'indium, le gallium ou le sélénium, le dioxyde de titane, l'oxyde de zinc ou encore les nanotubes de carbone pour le rendement des cellules photovoltaïques ;

- Les terres rares (lanthane, cérium, néodyme, etc.), le titanate de lithium, le noir de carbone ou les nanotubes de carbone pour la performance des batteries et accumulateurs ;
- Les nanotubes de carbone pour le rendement des piles à combustible.

Diffusion des applications des nanomatériaux dans le secteur de l'énergie

Le secteur de l'énergie se situe parmi les cinq premiers secteurs utilisateurs de nanomatériaux en France. Ce secteur n'a pas de tradition d'utilisation de nanomatériaux « historiques » mais il offre des nanomatériaux récents dont la maturité à court terme est élevée (DGCIS, 2012). Seulement une quinzaine d'entreprises ont été identifiées dans l'intégration de nanomatériaux, mais en amont, d'autres entreprises productrices sont recensées, surtout des PME, issues notamment du secteur de la microélectronique et l'ensemble pourrait se développer rapidement. Ce secteur compte parmi ceux susceptibles d'utiliser à l'avenir les plus fortes quantités de nanomatériaux manufacturés (Académie des technologies, 2012). S'agissant des nanomatériaux, les applications au service du développement de l'énergie solaire et du stockage de l'énergie sont les plus attendues.

Au niveau mondial, les prévisions de croissance des divers segments de marché de l'énergie sont toutes à deux chiffres ; elles vont de 10 à 70 % de croissance annuelle ! Le seul marché des batteries (optimisées par des nanomatériaux pour plus de puissance et de durée de vie), déjà proche de plusieurs milliards pourrait atteindre 43 milliards USD à l'horizon 2020. Les applications de la superconductivité et des supercapacités esquissent une croissance comprise entre 10 % et 20 %. La diffusion des cellules photovoltaïques présente une progression d'environ 40 % suggérant un marché spécifique de 7 milliards USD en 2020. En comparaison, l'ensemble du marché de l'énergie photovoltaïque doublerait en dix ans, voisin de 30 milliards USD en 2010, il atteindrait 70 milliards USD en 2020 (Rapport IEC, 2013). Ainsi en 2030, un tiers des nouvelles capacités de production électriques serait dû aux énergies renouvelables, celles-ci produisant près de 3000 GW (au lieu de 1500 GW aujourd'hui).

La France, qui mise sur ces technologies est déjà riche en ressources énergétiques renouvelables : elle dispose de la quatrième surface forestière d'Europe derrière la Suède, la Finlande et l'Espagne. Elle bénéficie également d'un fort potentiel hydraulique, éolien et géothermique ; cela en fait le second producteur européen d'énergies renouvelables après l'Allemagne. En 2012, la production primaire d'énergies renouvelables totalisait 22,4 Mtep. Le bois-énergie en représentait 45 %, l'hydraulique 22 %, les biocarburants 11 % et les pompes à chaleur 6 %.

Pour lever les obstacles de la commercialisation et garantir les objectifs de développement, certains défis restent parfois à relever ; ils peuvent être scientifiques (relevant des sciences fondamentales sur les propriétés des nanomatériaux), techniques (pour augmenter le rendement des matériaux composant les panneaux photovoltaïques dans le solaire par exemple) ou encore économiques et organisationnels pour disposer de process industriels stables et peu coûteux comme pour le revêtement à base de nanomatériaux.

Prospective

Que ce soit sous formes de poudres, de composites ou de films nanostructurés, les applications des nanomatériaux aux domaines de l'énergie sont multiples. Leur développement à venir va dépendre en particulier des évolutions de la demande en matière d'énergie et des évolutions des filières industrielles. Sur ces deux registres, des scénarios ont été élaborés au niveau international. Ils esquissent des feuilles de route qu'il est intéressant de combiner. S'agissant des énergies, en France, le Débat National sur la Transition Énergétique a conduit à l'élaboration de quatre trajectoires (familles de scénarios) relatifs à la consommation d'énergie, en relation avec l'édition 2013 du rapport « World Energy Outlook » (WEO) de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE). Ils justifient le programme d'action français et ses objectifs à l'horizon 2035 et 2050. Sur le plan des nanomatériaux appliqués à l'énergie, des exercices de prospective internationale ont également été conduits spécifiquement (cf. rapports IEC et BBC). Ils dessinent des horizons temporels à plus ou moins court terme allant de 2012 à 2030, horizons dits prévisibles, probables et vraisemblables quant à l'influence des nanotechnologies sur les secteurs de l'énergie solaire et le stockage de l'énergie.

Alors qu'au niveau démographique, la population mondiale s'accroît et que 20 % de celle-ci a encore un accès limité à l'énergie, le développement du marché de l'énergie devrait bénéficier aux nanotechnologies. Les leviers de ce développement seront d'abord sociaux et économiques, relatifs à la demande sociale en matière d'énergies propres et de développement durable, ceci en lien avec les ressources énergétiques naturelles disponibles (pétrole, gaz, eau, etc.) et les prix du marché. Ils seront encore techniques compte tenu de la longueur du cycle technologique et de l'échelle de temps de l'ordre de plusieurs décennies pour une maturité des technologies. Enfin, les leviers sont également écologiques et politiques, liés à des potentiels événements climatiques majeurs et de possibles crises internationales jouant sur le financement et les régulations des marchés. Tout ceci pèsera donc sur les délais de mise à disposition d'applications performantes produites industriellement dans un cadre normatif plus ou moins clair...

Hypothèses

Hypothèse I

À l'instar de la situation actuelle, le développement des nanotechnologies pour l'énergie s'opère dans tous les secteurs de l'énergie : solaire photovoltaïque, batteries et générateurs électriques, réservoirs à hydrogène, raffinage de produits pétroliers, production d'éthanol, additifs, etc. Ce développement, progressif, est lent et s'il profite potentiellement à toutes les technologies, celles-ci se développent au gré des marchés et des politiques qui fluctuent. Cette situation est illustrée par le cas du photovoltaïque qui a connu un subventionnement public important ensuite restreint et moins avantageux pour les particuliers, à l'origine d'un mouvement de création d'entreprises puis de cessations d'activité et de fusion-concentrations dans le secteur, en attente d'autres rendements et d'autres marchés publics... Si les aides publiques servent d'accélérateurs ponctuels aux technologies, le développement n'en est pas moins erratique.

Hypothèse 2

Le développement des nanotechnologies pour l'énergie est limité à certains marchés de l'énergie en fonction de politiques nationales plus ou moins coordonnées, structurant les contextes réglementaires. La supériorité à l'avenir des filières d'énergie renouvelable en termes économiques et d'emplois est démontrée, accélérant le déclin des filières d'énergies fossiles. À ce titre, les applications dans le photovoltaïque et le stockage d'énergie sont privilégiées. Inversement les enzymes pour la production d'éthanol sont délaissées compte tenu de la limitation des agro-carburants au motif écologique. Les applications pour le raffinage ou les additifs du pétrole sont restreintes à quelques produits simples et au rapport coût/bénéfice élevé.

Hypothèse 3

La survenue d'une crise climatique ou d'un conflit international renforcent l'enjeu de sobriété et d'indépendance énergétique de la France. Le nucléaire conserve son rang de secteur prioritaire autant au motif de sa sûreté que de sa capacité de production mais son approvisionnement est menacé ou compliqué. La nécessité de disposer de sources locales d'approvisionnement et de réduire les dépenses d'énergie pousse à un développement accéléré d'applications des nanomatériaux dans tous les domaines (énergies fossiles et renouvelables, économies d'énergie, etc.) au gré des coopérations internationales autorisées. Le stockage de l'énergie devient aussi un secteur clef de développement ; les développements sont conditionnés à l'accès à certaines matières premières rares.

Références

- Académie des technologies, « Risques liés aux nanoparticules manufacturées », Le Manuscrit, Paris, 2012.
- Bulletin électronique du ministère des affaires étrangères français, « Les nanosciences au cœur des technologies propres », BE États-Unis n° 271, 16/12/2011.
- International Electrotechnical Commission (IEC), « Nanotechnology in the sectors of solar energy and energy Storage », Technology report, Geneva, Switzerland, 2013.
- Klein E. Le small bang des nanotechnologies, Odile Jacob, Paris, 2011.
- Techniques de l'Ingénieur, « Le guide des nanotechnologies », 2^e édition, Paris, 2013.
- Avis du CESE sur le projet de loi de programmation pour un nouveau modèle énergétique français, Plénière du 9 juillet 2014.
- Commissariat général au développement durable, Chiffres et statistiques, n° 539, juillet 2014.

L'environnement

Éric Drais, INRS

Définition

Le secteur de l'environnement ici présenté correspond aux éco-activités *Green jobs*. Cela concerne les activités qui produisent des biens et services ayant pour finalité la protection de l'environnement ou la gestion des ressources naturelles¹.

Selon les définitions en vigueur (définition internationale de l'OCDE et d'Eurostat), la protection de l'environnement vise à prévenir, diminuer les émissions de polluants et les autres dégradations causées à l'environnement. Elle comprend : protection de l'air ; gestion des eaux usées, des déchets, des déchets radioactifs ; réhabilitation des sols et des masses d'eau ; lutte contre les nuisances sonores ; protection de la biodiversité et des paysages. La gestion des ressources naturelles vise, elle, à diminuer les prélèvements sur les ressources naturelles : en plus de la maîtrise de la consommation d'énergie, la récupération et la gestion durable de l'eau, elle comprend *a priori* le développement des énergies renouvelables. Néanmoins ce secteur d'activité est également parfois associé au secteur de l'énergie. C'est ce dernier choix qui a été opéré dans ce travail, l'application des nanotechnologies pour la production solaire d'électricité par exemple, étant intégrée dans la fiche marché Énergie.

En résumé, le marché de l'environnement concerne les biens et services destinés à mesurer, prévenir, limiter ou corriger les dommages environnementaux causés à l'eau, l'air et le sol et les problèmes relatifs aux déchets, aux bruits et aux écosystèmes. Ces éco-activités constituent le cœur des activités de l'économie verte, économie en développement en France et dans le monde. En France, en 2012, les emplois (en ETP) mobilisés par les activités de l'économie verte sont en hausse (+ 4 % par rapport à 2004) ; ils affichent une dynamique plus marquée que l'ensemble de l'économie

¹ Ne sont pas considérés ici les impacts environnementaux des nanomatériaux en tant que conséquences du développement des nanotechnologies pour l'environnement (consommation de ressources naturelles et rejets liés à la production de nanomatériaux). Il semble, par exemple, que le bilan environnemental de certains nanomatériaux soit particulièrement discutable (cas des nanotubes de carbone dont la fabrication est dispendieuse en eau et en énergie). De même, la bio-accumulation ou la persistance de nanomatériaux dans l'environnement, difficiles à détecter et circulant dans la chaîne alimentaire est une éventualité très discutée par les assureurs (International Risk Governance Council, IRGC, 2011).

(+ 0,3 %). Estimés à près de 500 000 en 2011, ils représentent environ 2 % de l'emploi total². Parmi ces activités, la gestion des déchets (84 900), la gestion des eaux usées (69 800) et les énergies renouvelables (68 700) pourvoient à eux seuls la moitié des emplois environnementaux (Commissariat général au développement durable, Observatoire national des emplois et métiers de l'économie verte. Le marché de l'emploi de l'économie verte, Études et Documents, n° 110, août 2014).

Rétrospective

Applications des nanotechnologies à l'environnement

Le coût croissant des ressources naturelles et de l'énergie, associé au développement de la conscience environnementale poussent à la mise sur le marché de produits et procédés nouveaux porteurs de promesses pour la protection du climat et l'environnement. C'est d'ailleurs dans ce domaine qu'historiquement les espoirs des nanomatériaux s'étaient initialement portés. En France, s'agissant de nanotechnologies, l'ingénierie de l'environnement commence à déployer des techniques, principalement de nanofiltration pour le traitement de l'eau, de catalyse pour la remédiation des pollutions diffuses et d'utilisation de nanocapteurs pour la détection des polluants (Le déploiement industriel des nanotechnologies et de la biologie de synthèse sur les territoires, Rapport, décembre 2013).

Plus généralement en matière d'environnement, l'utilisation des nanomatériaux est envisagée pour la réduction des émissions de polluants, le traitement des effluents notamment par photocatalyse et la purification des gaz, la séquestration de gaz à effet de serre, la production d'eau ultra pure à partir d'eau de mer, une meilleure utilisation, récupération et un meilleur recyclage des ressources existantes, des analyseurs chimiques spécifiques et multi-substances en temps réel (détection et neutralisation de micro-organismes et de pesticides par exemple), etc. Ces applications sont parfois regroupées sous le terme d'écotechnologies ou de Green nanotechnologies. Les nanomatériaux pourront être développés notamment sous la forme de membranes organiques nano-fonctionnelles, de catalyseurs, de filtres, de céramiques nanoporeuses et d'aérogels.

Les exemples emblématiques de l'utilisation des nanomatériaux pour l'environnement concernent la dépollution des sols et de l'eau et le captage du CO₂. Pour la dépollution, des nanoparticules de fer peuvent être injectées dans des nappes ou des sites contaminés : sur la base d'une réaction d'oxydo-réduction qui va les faire rouiller, les particules métalliques peuvent réduire les composés organiques et inorganiques. Ces particules de fer nanométriques sont 10 à 1000 fois plus réactives que les poudres métalliques habituelles. Ainsi traités, des polluants tels que le chrome VI se retrouvent dans des formes moins toxiques (chrome III) et précipitées. Les nanoparticules de fer peuvent

² Ces emplois à finalité environnementale directe peuvent paraître réduits, l'économie verte au sens d'activités liées à l'environnement concernerait au total près de quatre millions de personnes en emplois (Commissariat général au développement durable, Comprendre l'emploi dans l'économie verte par l'analyse des métiers, Le point sur n° 188, juin 2014).

également être utilisées pour éliminer des polluants comme l'arsenic présent dans l'eau potable de nombreux pays : l'arsenic peut être capté par les nano-oxydes de fer qui, magnétiques, peuvent être isolés et permettent ensuite de recycler ces composants.

Pour la capture (ou captage) du CO₂ (ou *Carbon Capture and geological Storage, CCS* en anglais), les procédés consistent à piéger les molécules de CO₂ avant, pendant ou après l'étape de combustion afin d'éviter sa libération dans l'atmosphère. La capture avant la combustion s'appelle précombustion ; la capture après une combustion classique (à l'air), postcombustion et la capture après une combustion à l'oxygène pur, oxycombustion. Les nanomatériaux sont particulièrement étudiés pour le captage post-combustion d'installations existantes. Si ce captage s'effectue aujourd'hui principalement par refroidissement et réaction chimique à partir de solvants, le captage par séparation membranaire exploite les propriétés des nanomatériaux : il s'agit de séparer physiquement le CO₂ des autres composants des fumées grâce à une membrane poreuse sélective. Le CO₂ extrait se présente dans tous les cas sous forme gazeuse ou liquide. Il est prévu qu'il soit ensuite stocké dans des formations géologiques du sous-sol permettant sa séquestration sur le long terme, au moins de plusieurs siècles.

La désalinisation de l'eau de mer est également un enjeu fort dans les zones arides de la planète. Il existe déjà une technologie simple à mettre en œuvre, dite d'osmose inverse. Le principe est celui de la filtration basée sur des membranes poreuses dont le problème actuel est qu'elles nécessitent de très hautes pressions et donc consomment énormément d'énergie. L'enjeu des nanomatériaux serait de purifier l'eau avec des membranes moins épaisses que celles utilisées aujourd'hui et nécessitant alors moins d'énergie. Le graphène, matériau résistant, qui se présente comme une couche dont l'épaisseur - celle d'un atome de carbone - est mille fois plus fine que les membranes existantes, semble pouvoir répondre à ce double défi énergétique et de développement...

De nombreux nanomatériaux sont donc susceptibles d'être utilisés pour des applications environnementales. Signalons ainsi :

- l'argent, le dioxyde de titane, l'oxyde de fer, le palladium, les nanotubes de carbone, le polyuréthane amphiphile comme agents de dépollution des eaux et des sols du fait de leurs propriétés de dégradation-absorption de contaminants tels que l'arsenic, les pesticides, les hydrocarbures aromatiques polynucléaires, etc. ;
- l'or pour la détection du mercure ;
- le graphène, l'argent, le dioxyde de titane, l'oxyde d'aluminium, le dioxyde de zirconium, l'aquaporine et les nanofilaments de polymères utilisés dans des membranes de filtration des liquides et des gaz ;
- le dioxyde de cérium, l'or et l'oxyde de fer comme additifs au diesel ou composants de pots catalytiques du fait de leurs fonctionnalités de catalyseurs de combustion ou d'oxydation au service de la dépollution automobile ;
- les quantum dots et les fullérènes comme capteurs et composants d'outils de mesure ou de contrôle du fait de leurs propriétés lumineuses ;
- etc.

Diffusion des applications des nanomatériaux dans le secteur de l'environnement

Le secteur des éco-industries se situe dans les derniers rangs des secteurs utilisateurs de nanomatériaux en France, seulement 5 ou 6 entreprises utilisatrices du secteur ayant été identifiées dans l'enquête DGCIS de 2011. Il est vrai que les éco-industries font partie des secteurs utilisateurs où le niveau de maturité des produits commercialisés intégrant des nanomatériaux est le plus faible. Contrairement à des secteurs intégrant des nanomatériaux « historiques », ils proposent une offre de nanomatériaux nouveaux pour des produits ou services innovants mais dont les potentiels de développement sont en cours d'étude. Dans ces secteurs aux produits en cours de test ou de pré-industrialisation, persistent des verrous liés à la reconnaissance scientifique et la faisabilité industrielle ou la rentabilité.

Dans ce secteur, la France dispose néanmoins d'entreprises d'envergure avec des positions de leadership international dans les domaines de l'eau ou des déchets, qui sont en mesure d'exploiter le potentiel des nanotechnologies. Sur les 140 applications majeures des nanobiotechnologies recensées en France par le rapport NanoThinking (2013), 11 % - soit une quinzaine - concerne l'environnement.

L'environnement a pour lui de constituer un enjeu politique majeur particulièrement en France. À ce titre, il importe de considérer les politiques nationales. La ministre française de l'Écologie a ainsi présenté à l'été 2014, le projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte. Il s'agit d'un projet de loi majeur du quinquennat qui fixe des objectifs précis et met en place des outils pour faire baisser la facture énergétique de la France et lutter contre le réchauffement climatique.

Parmi les objectifs figure notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 avec une division par quatre à l'horizon 2050 (facteur 4 = réduction de 75 %). Les émissions françaises de gaz à effet de serre sont suivies dans le cadre du protocole de Kyoto. Pour mémoire, les pays signataires de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques se sont fixé pour objectif de contenir la hausse des températures à moins de 2°C par rapport à l'ère pré-industrielle. Pour atteindre cet objectif, les émissions mondiales doivent être réduites de moitié d'ici 2050, par rapport à celles de 1990. Dans ce cadre, « la réduction des risques liés au changement climatique passe par deux champs d'action complémentaires : d'une part les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique et d'autre part l'adaptation au changement climatique » (ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie). Ces deux domaines sont l'objet de politiques internationales, régionales et nationales permettant de réduire les émissions et de se préparer au mieux au climat de demain.

Ainsi, Paris accueillera en 2015 la prochaine conférence mondiale sur le climat en l'absence d'une agence internationale de l'environnement. Néanmoins, il semble exister une volonté actuellement pour trouver un accord sur un cadre européen pour l'énergie et le climat à l'horizon 2030.

Un élément clef de la politique climatique européenne est de poursuivre le système d'échange de quotas d'émissions de CO₂, dit EU ETS pour *European Union Emissions Trading Scheme*, mis en place dès 2005 sur le même principe que le marché international

du protocole de Kyoto. L'EU ETS impose depuis 2005 un plafond d'émissions à environ 11 400 installations industrielles, responsables de près de 50 % des émissions de CO₂ de l'Union européenne. Ces installations industrielles doivent restituer chaque année autant de quotas (1 quota = 1 tonne de CO₂) que leurs émissions vérifiées de l'année précédente. Depuis 2008, elles sont également autorisées à utiliser une quantité de crédits Kyoto (URCE ou URE) limitée à 13,5 % de leur allocation en moyenne. Initialement, l'EU ETS ne couvrait que les émissions de CO₂. Depuis 2013 sont également couvertes les émissions de N₂O et de SF₆ des secteurs de la production chimique et d'aluminium. Le secteur énergétique (production d'électricité et de chaleur, raffinage, cokeries) est le principal secteur de l'EU ETS. Les producteurs d'électricité à eux seuls ont reçu environ 50 % des allocations totales. Le marché des gaz à effet de serre peut être considéré comme un levier pour des applications directes des nanotechnologies dans le domaine.

La France se veut d'ailleurs être sur la scène internationale un bailleur de fonds majeur pour aider les pays en développement à réduire leurs émissions et à s'adapter aux impacts du changement climatique. Elle soutient ainsi ses industries sur ce registre. D'un point de vue économique, en 2012, la production dans les éco-activités a atteint 85 milliards d'euros soit 2,3 % de valeur de la production totale. Le montant de la valeur ajoutée s'élève à 32 milliards d'euros et celui des exportations atteint 9,1 milliards d'euros soit 2,1 % du total des exportations. Les exportations dans les éco-activités ont augmenté de 0,6 % entre 2011 et 2012. La balance commerciale des éco-activités présente un excédent de 3,2 milliards d'euros en forte augmentation par rapport à 2011 (1,2 milliard d'euros) suite à une baisse importante des importations (Les éco-activités et l'emploi environnemental en 2012 : premiers résultats, Chiffres & statistiques n° 523, mai 2014).

Prospective

De nombreux développements des nanomatériaux sont attendus à l'avenir pour répondre aux défis environnementaux. Ils sont à mettre en correspondance avec les évolutions de la demande et de la production qui s'esquissent dans le domaine. Dans le cadre du Débat national sur la transition énergétique, quatre trajectoires (familles de scénarios) ont été étudiées pour prévoir les consommations d'énergie et les émissions de polluants et appuyer la politique française. Ces scénarios ont été rediscutés en 2014 en relation avec l'édition 2013 du rapport *World Energy Outlook* (WEO) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Ce rapport annuel présente, en plus de 500 pages, différents scénarios de politiques énergétiques jusqu'en 2035, permettant d'analyser les grandes évolutions énergétiques en cours ou à venir et les enjeux et les limites du point de vue de la lutte contre le changement climatique.

Le WEO est un document de référence pour analyser les tendances énergétiques et les impacts des politiques menées. Il confronte le scénario central « Nouvelles politiques » qui tient compte des engagements en matière de réduction des gaz à effet de serre, notamment suite aux accords de Cancun, avec le scénario tendanciel « Politiques

actuelles », qui décrit l'évolution des marchés mondiaux de l'énergie, en prenant en compte uniquement les politiques en vigueur mi-2013. Le WEO développe un troisième scénario « 450 ppm » proposant une évolution du système énergétique mondial, qui permettrait de faire diminuer les émissions de CO₂ liées à la combustion énergétique, afin de limiter le réchauffement climatique à 2°C (par rapport à l'ère pré-industrielle).

Le WEO rappelle, comme les années précédentes, que la trajectoire actuelle des émissions de gaz à effet de serre (GES) n'est pas compatible avec l'objectif climatique de + 2°C : le scénario central « Nouvelles politiques » induit une trajectoire conduisant à une hausse de la température à long terme d'au moins 3,6°C.

L'AIE met à jour chaque année ses scénarios et apporte des éclairages sur plusieurs déterminants du système énergétique mondial. Ainsi, en 2013, l'AIE insiste sur le nouveau monde énergétique qui tend à se mettre en place, caractérisé par de nouvelles zones de production et de consommation, et de nouvelles ressources. Toutefois, certaines tendances clefs persistent, en particulier la prédominance des énergies fossiles, ainsi que les disparités régionales des prix du gaz et de l'électricité. Ces disparités amènent ainsi le WEO 2013 à poser la question du lien entre énergie et compétitivité économique et à conclure que l'efficacité énergétique est un levier d'action majeur.

Les leviers de la transition énergétique consistent notamment à maîtriser la demande d'énergie, à faire croître le prix du carbone à un niveau incitatif, à mobiliser les banques publiques et privées pour créer des circuits de financement spécifiques (Conférence AIE-IFRI, 5 mars 2014). De ce contexte national et international sur le climat et le développement durable dépendent alors le développement de brevets relatifs aux applications des nanotechnologies à l'environnement, leur diffusion et l'amélioration des rendements des technologies et des coûts d'exploitation.

Ainsi s'esquissent les incertitudes de l'évolution future de la variable :

- l'amélioration du rendement et des coûts de ces technologies avec mise à disposition d'applications performantes produites industriellement ;
- les ressources énergétiques naturelles disponibles (pétrole, gaz, eau, etc.) et les prix du marché ;
- les événements climatiques majeurs ;
- les crises internationales pesant sur le financement et les régulations des marchés ;
- les connaissances de risques liés au relargage de nanostructures dans l'environnement ;
- le contrôle des marchés (eau, etc.) par des groupes privés maîtrisant les technologies et limitant l'accès aux marchés à certaines populations du fait du prix ;
- la stabilisation du contexte réglementaire relatif aux applications environnementales des nanotechnologies.

Hypothèses

Hypothèse 1

Développements erratiques des applications des nanomatériaux du fait de difficultés de gouvernance globale ou de coordination internationale. Certains marchés se développent mais de façon lente et limitée en fonction des politiques de soutien et/ou des risques environnementaux locaux (cas de la purification ou de la filtration des eaux dans le sol, de l'acceptation de lieux de stockage géologique du CO₂, etc.). Ce contexte favorise des avancées puis des coups d'arrêt comme on l'a connu dans le photovoltaïque à l'arrêt des subventions nationales avec une disparition et une concentration d'entreprises sur ce marché. Cette situation pourrait se reproduire à propos de la capture de CO₂ si le système d'échange de quotas d'émission (SEQE) de l'Union européenne ne parvient pas à susciter suffisamment d'investissements dans les technologies à faible intensité de carbone, ce qui risque de conduire à l'adoption de nouvelles politiques nationales qui remettront en cause les conditions de concurrence équitables que ce système était censé créer.

Hypothèse 2

Développement rapide de certaines applications profitant d'une coordination politique internationale. L'ouverture de marchés contrôlés par des investisseurs privés à la fois favorise un investissement massif pour certaines applications des nanotechnologies (dépollution, désalinisation, etc.), mais simultanément limite l'accès à ces technologies à certaines populations ou pays, alimentant des tensions quant aux ressources. L'accès à l'eau potable par exemple pourrait ne pas être réglé par le seul développement technologique qui supposerait des régulations politiques et économiques en complément.

Hypothèse 3

Développement accéléré du secteur de l'environnement car prioritaire en cas de crise climatique et/ou de conflit international. Volonté d'indépendance nationale des pays accélérant la mobilisation des acteurs locaux mais sans bénéficier de toutes les possibilités de coopération scientifique internationales.

Références

Diallo M. et Brinker C.J., "Nanotechnology for sustainability: environment, water, food and climate" in Roco M.C., Mirkin C.A., Hersam M.C., Nanotechnology Research Directions for Societal needs in 2020. Retrospective and outlooks, Springer, 2011, http://www.cein.ucla.edu/new/file_uploads/chapter05.pdf.

Hu A. et Apblett A. (Eds.), Nanotechnology for Water Treatment and Purification, Springer, 2014.

Filipponi L. and Sutherland D., Applications of Nanotechnologies: Environment, Chapter 2 in Interdisciplinary Nanoscience Centre (INano) Report, 2010 (programme financé par le FP7 de l'UE).

MacLurcan D. et Radywyl N. (Eds.), Nanotechnology and Global Sustainability (Perspectives in Nanotechnology), CRC Press, 2011.

Nanologue, The future of nanotechnology, Project report, 2006 (avec trois scenarii pour 2015).

ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nanologue_scenarios_en.pdf

Le textile

Martine Reynier, INRS

Définition

L'industrie textile rassemble l'ensemble des activités de conception, fabrication et commercialisation des textiles : fabrication de fibres textiles artificielles ou synthétiques, filature, corderie et filets, tissage, ennoblissement, fabrication de produits finis et distribution. Selon l'Union des industries textiles, ce secteur regroupe en France 2 300 entreprises, souvent de petite taille (taille moyenne de 40 salariés) et emploie plus de 65 000 salariés. L'industrie textile a connu une très forte internationalisation au cours des XIX^e et XX^e siècles, avec l'ascendance des pays en voie de développement, en particulier la Chine. Malgré cette concurrence, l'industrie textile française demeure dynamique dans les domaines du textile technique et du textile de luxe.

Les vêtements et les tissus d'ameublement représentent la part la plus importante et la plus connue des produits textiles. Au-delà de ces secteurs traditionnels, il existe aussi les textiles techniques qui ont de multiples applications et sont utilisés dans la quasi-totalité des secteurs industriels : de l'automobile au médical, du génie civil au bâtiment, de l'électronique à l'aéronautique... Un textile technique peut se définir comme tout produit ou matériau textile dont les performances techniques et les propriétés fonctionnelles prévalent sur les caractéristiques esthétiques ou décoratives.

Les textiles dits intelligents, de l'anglais *smart textiles*, également désignés sous l'appellation e-textiles pour *electronic textiles*, sont des textiles capables de capter ou d'analyser un signal afin d'y répondre d'une manière adaptée. Ils peuvent être produits en intégrant dans et sur le textile des détecteurs, des alimentations électriques ou des composants électroniques, mais aussi en ajoutant aux textiles des fibres et matériaux intelligents qui offrent une réponse à un stimulus ou à une excitation venant de l'extérieur (la température, une contrainte mécanique par exemple).

La France est fortement consommatrice de textiles techniques pour le secteur des transports (42 % de la consommation en 2005). Le secteur de l'industrie arrive en 2^{ème} position, avant le secteur des sports et loisirs. Les entreprises françaises spécialisées

dans les textiles techniques se répartissent principalement dans 5 secteurs : industrie, transport, médical, sports et loisirs et aménagement de la maison.

La consommation mondiale de textiles techniques est en hausse constante depuis 1995. En 2005, elle était estimée à 19,7 millions de tonnes, dont 4,8 millions en Europe. Euratex (données 2003) fournit pour la France les estimations suivantes :

- chiffre d'affaires du secteur des textiles techniques : 4 milliards d'euros,
- part des textiles techniques dans l'industrie textile : 17 %,
- nombre d'entreprises de textiles techniques : 300,
- nombre d'entreprises exclusivement dédiées aux textiles techniques : 120,
- nombre d'employés : 20 000.

Le développement des textiles techniques s'appuie sur des travaux de recherche qui portent sur les matériaux (mise au point de nouvelles générations de fibres), la mise en œuvre des fibres (développement de nouveaux procédés), le traitement des textiles (optimisation du traitement chimique ou développement de nouvelles technologies) et l'ajout de fonctionnalités. Dans ce secteur comme dans beaucoup d'autres, les nanotechnologies ouvrent de nouvelles perspectives.

Indicateurs pertinents

- Nombre de brevets pour cette application.
- Nombre de produits recensés pour ce secteur (base de données du Wilson Center).
- Quantité de substances à l'état nanoparticulaire déclarées dans R-Nano (usage textile).

Rétrospective

La production de textiles multifonctionnels constitue une des applications prometteuses des nanotechnologies. Les nanomatériaux peuvent être introduits dans le textile de deux manières différentes dans le processus de production :

- soit intégrés au fil avant extrusion (nanocomposite) ;
- soit ajoutés aux enductions de textile (*coating*, *nanofinishing*).

En fonction des développements en nanoélectronique, des nanomatériaux peuvent être inclus dans les composants électroniques intégrés dans les textiles intelligents.

La littérature décrit de nombreuses propriétés qui peuvent être apportées ou améliorées par l'utilisation de nanomatériaux : résistance mécanique, réduction du rétrécissement, capacité ignifuge, stabilité UV, conductivité électrique, propriétés antisalissure, comportement antistatique, propriétés antimicrobiennes, plus grande résistance à la traction, meilleure tenue au vieillissement...

Les nanomatériaux retenus pour ces applications sont essentiellement les nanoargiles, les oxydes métalliques (dioxyde de titane, alumine, silice synthétique amorphe, oxyde de zinc, oxyde de magnésium) et le nanoargent. Les nanotubes de carbone nourrissent d'énormes espoirs grâce à leur solidité et leur conductivité électrique, mais des difficultés techniques et leur coût semblent retarder leur développement.

Quelques exemples d'application potentielle des nanotechnologies dans l'industrie textile:

- traitement de la laine avec des nanoparticules d'argent aux propriétés bactéricides pour tapis, tissus d'ameublement destinés aux transports publics, chaussettes, vêtements de sport ; les nanoparticules d'or ont également été proposées mais uniquement pour des articles de luxe compte tenu du prix...
- enduction à effet antibactérien (oxyde de zinc) pour les textiles utilisés dans le secteur médical ;
- enduction améliorant la résistance aux UV pour les vêtements de sport ou les textiles utilisés dans la construction (bâches par exemple) ;
- amélioration de la résistance à la chaleur des vêtements de protection des pompiers (en introduisant par exemple une couche intérieure composite à base de fibre d'aramide et de nanoparticules de carbone) ;
- nanofibres organiques munies de propriétés piézo-électriques permettant à des vêtements de générer de l'électricité pour des appareils électroniques de poche à travers les mouvements du corps ;
- intégration de puces ou de capteurs dans les vêtements afin de surveiller l'état de santé de la personne ou les risques extérieurs.

Vu l'attrait de ces applications, il est prévu que l'utilisation des nanomatériaux dans les produits textiles connaisse une croissance importante dans les prochaines années. À ce jour, il existe peu d'information sur les produits déjà commercialisés :

- l'institut de recherche et d'essai sur les textiles Hohenstein a commencé à développer un label de qualité pour éviter que le terme nanotextile ne soit utilisé dans des situations qui ne sont pas directement liées à l'utilisation des nanotechnologies (Hohenstein quality label). En septembre 2009, quatre produits textiles avaient reçu ce label ;
- un inventaire réalisé entre 2009 et 2012 sur internet par le BEUC et l'ANEC recense 21 produits (ou gamme de produits) contenant du nanoargent, essentiellement des vêtements, sous-vêtements ou du linge de maison ;
- dans la base de données du Woodrow Wilson international center for scholars aux États-Unis interrogée début 2014 (www.nanotechproject.org/cpi), 156 produits sont répertoriés dans la catégorie Habillement. La plupart de ces produits sont présentés comme ayant des propriétés hydrofuge, antiallergie, anti-odeur ou antibactérienne (nanoargent) ;
- dans le premier bilan établi fin 2013 des déclarations de substances à l'état nanoparticulaire (base de données R-nano), l'usage Fabrication de textiles, cuir, fourrure est mentionné pour 11 substances, dont la silice synthétique amorphe, le dioxyde de titane et le noir de carbone (mais pas le nano-argent).

Ces bases de données ne sont pas exhaustives et ne permettent pas d'avoir une vision claire de la réalité du développement des nanomatériaux dans le secteur applicatif des textiles. Elles montrent néanmoins que leur utilisation est encore à un stade précoce.

Prospective

C'est d'abord la capacité d'innovation et de recherche de l'industrie textile qui devrait dicter l'avancée des nanotechnologies dans ce secteur. Les domaines les plus dynamiques en termes de recherche et développement sont le médical, les transports et, à un moindre degré, le génie civil et la protection individuelle. Toutefois, avant de réaliser une production et une commercialisation à l'échelle industrielle, certains obstacles doivent être écartés :

- les nombreux verrous scientifiques et technologiques : par exemple la difficulté de réaliser une dispersion uniforme des nanomatériaux dans les pâtes d'enduction et les polymères ou de fabriquer des produits durables et résistants sur le long terme ;
- les enjeux globaux de protection de l'environnement (recyclabilité, biodégradabilité des produits) et de réduction de la consommation d'énergie ;
- la performance prix de revient versus bénéfice : même si l'utilisation de nanomatériaux améliore les produits, ils restent souvent trop coûteux ;
- la faisabilité industrielle : passage de l'échelle laboratoire à l'échelle industrielle ;
- les habitudes des consommateurs : les consommateurs peuvent par exemple préférer continuer à laver régulièrement les vêtements de manière traditionnelle, plutôt que de faire confiance à une technologie nouvelle antisalissure ;
- l'environnement réglementaire et sociétal, en particulier l'acceptabilité des consommateurs vis-à-vis des produits intégrant des nanomatériaux.

Une étude sur la maturité des applications des nanomatériaux dans l'industrie textile publiée en 2007 ne prévoyait une percée réelle des nanotechnologies dans ce secteur qu'au-delà des années 2015-2020.

Hypothèses

Hypothèse I. Des innovations et une utilisation marginale

Les laboratoires de recherche cherchent à développer de nouveaux procédés, mais les innovations qu'ils proposent restent limitées ou ne présentent pas une valeur ajoutée suffisante pour passer au stade de l'industrialisation. L'utilisation des nanomatériaux dans les textiles reste marginale au niveau mondial.

Hypothèse 2. Développement intensif en France dans les textiles techniques

L'industrie textile française cherche à conforter sa compétitivité en se spécialisant dans des activités émergentes de haute technologie. Des investissements importants sont engagés sur les nanotechnologies, avec principalement des retombées dans le domaine des textiles techniques.

Hypothèse 3. Développement dans les textiles techniques, mais pas en France

L'industrie textile française limite ses investissements et on assiste à un déclin de ce secteur d'activité. Toutefois des avancées technologiques se produisent dans d'autres parties du monde et de nombreux produits textiles intégrant des nanomatériaux sont importés et arrivent sur le marché européen avec des applications multiples.

Références

Étude sur les textiles techniques conduite par le Cabinet Développement et conseil pour le compte de la Direction générale des entreprises - Rapport de synthèse - Mars 2006.

Nanotechnology textiles. Nanowerk spotlight, mis en ligne le 16 décembre 2010 sur <http://www.Nanowerk.com>

Nouveaux matériaux. Centexbel INFO, n°9 du 30 novembre 2009.

Nano-textiles. NanoTrust-Dossier n°015en, décembre 2010 : epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier015en.pdf

Nano Textiles. Grundlagen und Leitprinzipien zur effizienten Entwicklung nachhaltiger Nanotextilien, EMPA et TVS Textilverband Schweiz, Suisse, septembre 2011.

Van Broekhuizen F. *Nano in furniture. State of the art 2012*. IVAM Research and Consultancy on Sustainability (Plantage Muidersgracht 24, 1018 TV Amsterdam, Pays-Bas), 2012.

ANEC/BEUC inventory of products claiming to contain nano-silver particles available on the EU market, 2012, disponible sur www.anec.org

Kaounides L, Yu H, Harper T. *Nanotechnology innovation and applications in textiles industry: current markets and future growth trends*. Materials Technology. 2007, vol. 22, n° 4, pp. 209-37.

Le transport

Olivier Witschger, INRS

Définition

Le transport désigne le déplacement d'objets, de marchandises ou d'individus (humains ou animaux) d'un endroit à un autre. On distingue généralement trois modes de transport :

- le transport terrestre (routier et ferroviaire),
- le transport aquatique (maritime et fluvial),
- le transport aérospatial (aérien et spatial).

Le secteur du transport et de la logistique (ensemble des services qui permettent de gérer les flux de matières) est une des principales filières de l'économie mondiale. Rien qu'en France, il emploie plus d'un million de personnes. La multiplication des échanges internationaux place cette filière au tout premier rang.

Cette fiche variable-marché traite plus particulièrement des applications actuelles et futures des nanomatériaux dans les secteurs du nautisme, du naval, de l'automobile et de l'aérospatial.

Rétrospective

Selon un rapport datant de 2012 de la Direction générale de la compétitivité de l'industrie et des services du ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie (DGCIS, MINEFI), le marché des transports est un des marchés applicatifs des nanomatériaux les plus porteurs et compétitifs pour la France avec le BTP, les industries de la santé, du luxe et la défense. Le nombre d'entreprises du secteur des transports représenterait 15 % du nombre total d'entreprises utilisatrices des nanomatériaux. Cela est dû pour partie à l'utilisation de produits qui intègrent des nanomatériaux dits historiques.

Secteurs nautique et naval

La France, ouverte sur quatre espaces maritimes, représente 10 % des côtes maritimes européennes (7 000 km). Cet espace, propice aux activités nautiques, compte 4 millions de plaisanciers et plus de 500 000 bateaux de plaisance en activité en 2012.

La filière nautique, au sein de laquelle on peut distinguer le nautisme grand public des activités spécifiques liées à la course au large (bateaux destinés à des fins sportives), représente environ 5 000 entreprises et plus de 41 000 salariés ; elle est structurée suivant différents secteurs d'activités. Celui de la construction représente 25 % des 4,5 milliards d'euros de chiffre d'affaires de la filière (chiffre 2012) ; il est à égalité avec le négoce. Viennent ensuite la réparation (15 %), le marché de l'équipement (15 %) et la motorisation, les ports ou encore la location (10 %). La filière s'articule essentiellement autour de PME-TPE puisque qu'environ 75 % des entreprises ont moins de 20 salariés.

En 2011, la production nautique française était assurée par 223 chantiers de construction qui employaient un effectif total de près de 8 000 salariés. Avec un taux d'export 2011/2012 proche de 68 % (multiplié par 4 en 10 ans), l'industrie nautique française est un des secteurs où la France dispose de positions de leader : 5^{ème} rang de l'industrie mondiale de la construction de bateaux de plaisance en 2010 (3^{ème} rang au niveau européen derrière l'Italie et l'Allemagne) ; 1^{er} rang sur le segment des voiliers (29 % du marché) ; leader dans la construction de bateaux pneumatiques ; 4^{ème} producteur de bateaux à moteur. Si la crise financière a impacté le secteur, les exportations ont été assez peu affectées, ceci grâce aux marchés émergents ayant soutenu le secteur d'activité. En 2011/2012, après avoir plutôt bien résisté, comparativement à ses voisins européens, le marché français subit un recul marqué, en dépit d'un intérêt soutenu de la clientèle française, toujours nombreuse lors des grands rendez-vous hexagonaux du nautisme, qu'ils soient sportifs ou d'affaires.

La filière nautique se distingue de la filière dite navale qui regroupe un volet dit CRCN - construction, équipements, réparation et transformation de navires - qui sert les « cinq marines », défense, marchande, pêche, plaisance et recherche, et un volet qui regroupe les activités de construction de structures navales spécifiques destinées au développement des activités d'exploitation en mer.

Structurée autour de grands donneurs d'ordre (sept principaux groupes structurent le secteur), la filière navale s'appuie sur un réseau d'équipementiers et de sous-traitants de petite taille. Elle constitue une chaîne industrielle complète couvrant la totalité des métiers nécessaires à la construction des navires civils et militaires les plus complexes. L'industrie de la CRCN française se situe au 6^{ème} rang mondial et au 2^{ème} rang européen du marché global civil et militaire. En 2012, on dénombrait 69 chantiers navals dont 9 de plus de 100 employés. Le succès de la France dans ce domaine est dû au repositionnement permanent de ses acteurs industriels vers la production de navires d'une grande complexité, requérant de multiples compétences, le développement de technologies pointues et le recours à de nombreux fournisseurs pour les composants et sous-systèmes. Ceci lui permet de rester une activité fortement exportatrice : 50 % du carnet de commandes de la France en 2010 est destiné à l'exportation ; 80 % de la production française de navires civils est exportée. Cette évolution a été rendue possible notamment grâce aux capacités d'innovation (domaine dans lequel l'industrie navale française est à la pointe).

Si ces deux domaines, le naval et le nautisme, semblent *a priori* distincts, il s'avère que pour certains types de marchés la double compétence est un atout, voire une nécessité. Il en est ainsi de la construction et de l'entretien ou de la transformation (*refit*) d'unités de grande plaisance pour lesquelles les compétences coques sont plus du domaine de la navale et les aménagements et équipements du domaine du nautisme.

À ce jour, il n'y a pas d'information claire sur l'utilisation réelle des nanomatériaux dans la branche nautique et navale. Néanmoins, au côté des problématiques d'éco-conception, de réduction des rejets, d'efficacité énergétique, d'électronique embarquée, d'outils de conception adaptés, les nanomatériaux sont actuellement considérés comme facteurs différenciant par exemple dans le domaine :

- des pièces composites de hautes performances et de grandes tailles. Par exemple, l'incorporation de nanotubes de carbone dans des résines permet d'améliorer très sensiblement (200-300 % par rapport aux composites traditionnels) la résistance à la fracture sans pour autant augmenter le poids des pièces manufacturées ;
- des matériaux à base de nanofibres ou des traitements de surface offrant des propriétés de super-hydrophobicité. Ces technologies de revêtements visent à produire des surfaces à très faible friction, devant ainsi super-glissantes ;
- de la lutte contre la bio-salissure marine (*antifouling*). Composé d'organismes marins, de bactéries et d'algues cette bio-salissure couvre la coque immergée et renforce en quelques mois la résistance à l'eau et le poids d'un bateau, ce qui entraîne une consommation accrue de carburant. Un projet européen récent a démontré qu'un revêtement à base de pentoxyde de vanadium inhibait la formation de bio-salissure. Au-delà d'être efficace, ce type de revêtement (sous forme de peinture) permettrait de limiter l'emploi de biocides, seule solution réellement efficace à ce jour.

Secteur automobile

L'industrie automobile rassemble la construction de véhicules automobiles et la fabrication de fournitures diverses pour ces véhicules. En termes d'emploi, la branche construction de véhicules occupait en 2012 directement 215 000 personnes (hors intérimaires pouvant représenter jusqu'à 10 % des effectifs), soit 7 % de l'emploi salarié de l'ensemble de l'industrie. Selon des chiffres diffusés par la Fédération des industries d'équipements pour véhicules (FIEV), les effectifs pour l'année 2012 de l'industrie des fournisseurs de l'automobile étaient de près de 240 000 personnes, dont un tiers pour les équipementiers, 27 % pour la mécanique, 14 % pour les pneumatiques et caoutchouc, 10 % pour la plasturgie et 8 % pour l'électronique. Les équipementiers en France représentent près de 375 établissements, dont la taille varie du groupe multinational à la PME spécialisée dans un procédé industriel. 70 % de la production française des équipementiers alimente les sites de production des constructeurs, en France ou à l'étranger.

Toujours en 2012, alors que la production mondiale de véhicules légers des constructeurs français s'élevait à 5,6 millions, un peu moins de 30 % ont été produits par les constructeurs français en France. Par rapport au niveau précédant la crise financière de 2008, la production des constructeurs français a chuté de 9 % dans un contexte économique mondial marqué depuis lors par la poursuite d'une croissance importante

dans les pays émergents. Longtemps second pays producteur en Europe, derrière l'Allemagne, la France, terre de production automobile, est désormais troisième derrière l'Espagne.

Afin de faire face à la crise, la filière automobile française s'est structurée. Ainsi, en octobre 2012, un contrat de filière a été signé dont l'un des quatre axes de travail est l'innovation et la R&D. Au travers des pôles de compétitivité automobiles, des actions transversales sont conduites pour répondre aux défis de l'excellence industrielle et de la mobilité durable ; elles associent les constructeurs, les équipementiers, les PME-PMI innovantes, les laboratoires de recherche et les organismes de formation.

L'innovation est au cœur de la stratégie de développement des équipementiers, qui consacrent en moyenne 6 % de leur chiffre d'affaires à la recherche et au développement de systèmes permettant d'améliorer la sécurité et le confort des passagers, ainsi que la préservation de l'environnement.

Une automobile est un produit qui doit satisfaire de nombreuses réglementations relatives principalement à la sécurité lors de chocs dans des configurations diverses, à l'environnement en relation avec la pollution par les gaz d'échappement et les gaz à effet de serre (CO₂), aux émissions sonores émises ainsi qu'à la « recyclabilité » des véhicules en fin de vie (valorisation, recyclage / réemploi des matériaux constitutifs).

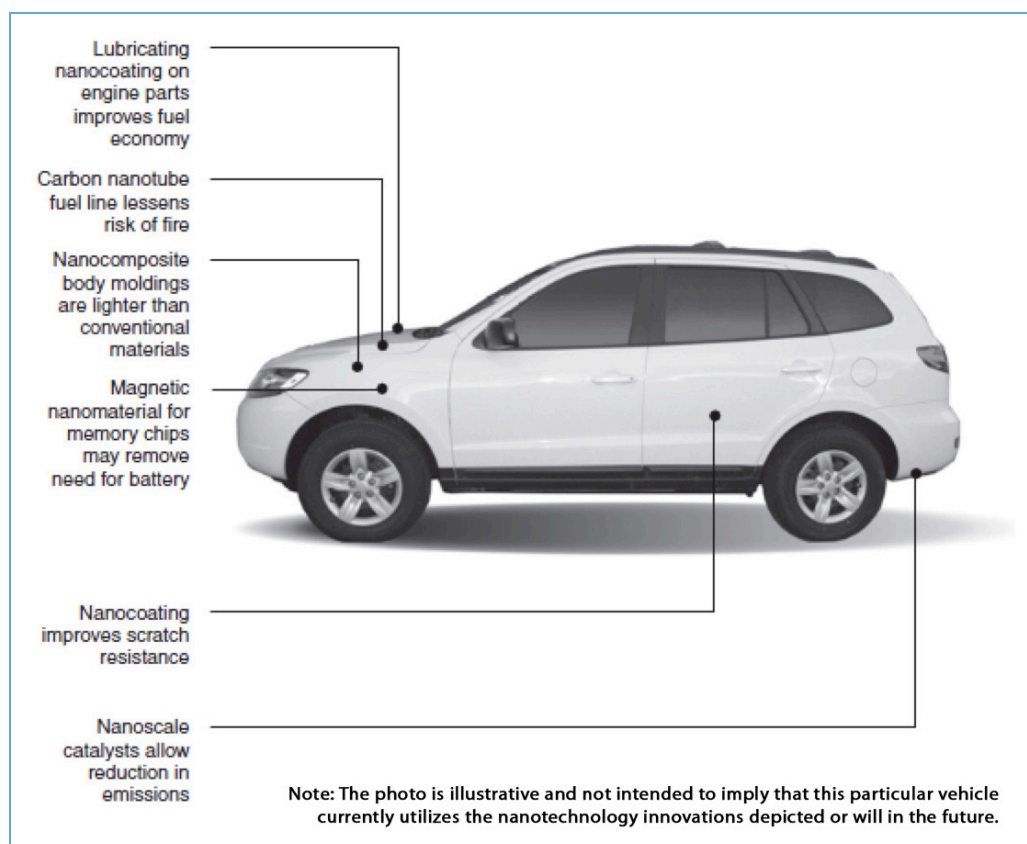


Figure 1. Exemple d'innovations actuelles et futures.

Source : Adapted by GAO from materials produced by Lux Research, GAO report, 2010.

Pour répondre à ces différentes exigences, et comme l'illustre la figure 1, le secteur automobile a investi depuis plusieurs années dans les nanomatériaux pour développer, par exemple :

- des matériaux composites plus légers mais toujours plus résistants pour la structure des véhicules,
- des matériaux à la tenue au feu améliorée pour les pièces intérieures,
- des matériaux limitant l'accumulation de charges électrostatiques,
- des textiles ayant des propriétés antibactériennes, antimicrobiennes, anti-odeurs,
- des catalyseurs, des additifs pour carburants, des lubrifiants, des fluides réfrigérants permettant d'améliorer l'efficacité du moteur et la consommation de carburant,
- des revêtements pour les vitrages améliorant le confort de vision, ou pour accroître la résistance à l'usure de pièces fortement sollicitées (vérins, distributeurs etc.),
- des peintures plus résistantes aux rayures et à la corrosion,
- des pneumatiques hautes performances alliant adhérence, résistance à l'usure et faible résistance au roulement,
- des dispositifs de stockage d'énergie (batteries, super-condensateurs, piles à combustibles),
- des dispositifs capables d'adapter la force d'amortissement en continu à base de fluides magnéto-rhéologiques,
- des composants électriques et électroniques.

À l'avenir, les nanomatériaux pourraient contribuer à améliorer de manière plus significative encore les performances des technologies existantes et matériaux pour les véhicules automobiles. À titre d'exemple, des constructeurs automobiles travaillent déjà :

- à la conception de batteries structurelles à haute capacité basées sur l'utilisation de nanomatériaux et dans lequel les panneaux extérieurs formant la carrosserie du véhicule font office d'accumulateur. Si ce concept de batterie structurelle est exploité à son maximum, ces batteries devraient pouvoir remplacer les batteries des voitures électriques du futur ;
- à la mise en œuvre de pièces acryliques ou polycarbonate nano-structurées pour l'ensemble du vitrage d'un véhicule. 50 % plus léger que le verre, ces nouveaux vitrages allient résistance et transparence quelle que soit la température et facilite des formes complexes de design ;
- à la conception de dispositifs thermoélectriques permettant d'utiliser les pertes thermiques inhérentes aux moteurs et de les convertir en énergie électrique.

Secteur aérospatial

Le secteur aérospatial concerne les industries des secteurs de l'aéronautique et de l'espace, mais également l'industrie de l'armement¹. En effet, technologiquement et industriellement, les industries aéronautiques, spatiales et militaires sont très proches.

¹ Ce dernier secteur fait l'objet d'une fiche spécifique donc n'est pas traité ici.

Le secteur aérospatial est tiré par différentes demandes : celles des états (secteur clé), des personnes (voyages), des entreprises (transport des marchandises), ou encore celle des organisations de tous types qui travaillent à la conquête de l'espace.

Pour répondre à ces demandes, la construction aéronautique est structurée autour de trois métiers que sont :

- les constructeurs d'aéronefs (avions, hélicoptères),
- les fabricants de structures (fuselages, ailes, nacelles de réacteurs) et de moteurs,
- les équipementiers qui fabriquent les sous-ensembles que sont les trains d'atterrissage, les gouvernes, les systèmes électroniques de vol, sièges, toboggans de secours, etc.

À ces trois métiers qui concernent plus de 260 entreprises en France, il faut ajouter plusieurs milliers d'entreprises, PME-PMI (4 500 environ) qui sont en situation de fournisseurs de l'industrie aérospatiale.

Premier secteur exportateur français (75 % du CA à l'export), l'industrie aérospatiale a généré, en 2012, 170 000 emplois (plus de 310 000 emplois avec les sous-traitants) pour un chiffre d'affaires de 42,5 milliards d'euros. Cette industrie ouverte sur le monde bénéficie d'un fort ancrage d'activités localisées principalement dans les régions Midi-Pyrénées, Aquitaine et en Île-de-France.

Les industriels du transport aérien ont subi des mutations majeures ces trente dernières années. Depuis 2000, European Aeronautic Defence and Space Company (EADS), rassemble les activités de plusieurs constructeurs (le français Aérospatiale-Matra, l'allemand DASA et l'espagnol CASA). Le groupe est aujourd'hui le leader mondial des secteurs de l'aéronautique, de l'espace et de la défense.

Dans le domaine des hélicoptères, Eurocopter, né d'une fusion franco-allemande, est le premier fabricant d'hélicoptères civils au monde.

Avec Astrium, EADS est aussi en pointe dans la construction de lanceurs spatiaux ainsi que de satellites de télécommunication et d'observation de la terre ; Astrium est aussi l'un des principaux actionnaires d'Arianespace (première société de lancement de satellites au monde).

À ce jour, on ne dispose pas d'information claire sur l'utilisation réelle des nanomatériaux que ce soit dans les branches aéronautique ou spatiale, même si à l'évidence elles sont de plus en plus à la recherche de :

- matériaux composites ultra-performants en termes de légèreté, de résistance, et de longévité pour les structures,
- de systèmes électroniques répondant à des spécifications toujours plus sévères en ce qui concerne la fiabilité, la compatibilité électromagnétique, l'immunité aux interférences, la puissance consommée, la sécurité,
- de systèmes de propulsion permettant de réduire fortement la consommation d'énergie propulsive et les émissions, ainsi que l'empreinte sonore des aéronefs.

Les enjeux, usages et opportunités des nanomatériaux dans le secteur aérospatial sont proches de ceux des secteurs automobile ou nautique avec cependant des contraintes inhérentes qui imposent des spécifications sévères en ce qui concerne la fiabilité, la compatibilité électromagnétique, l'immunité aux interférences, la puissance consommée, la sécurité.

À l'avenir, les nanomatériaux devraient contribuer à ce que les moyens de transport aériens et spatiaux soient plus légers, puissent emporter plus de charge utile tout en consommant moins d'énergie et en polluant moins.

Parmi les technologies à plus ou moins faible niveau de maturité, on peut citer à titre d'exemple le développement :

- d'un système de dégivrage pour ailes d'avion à base de nanomatériaux non métallique, améliorant par ailleurs la protection contre la foudre et augmentant la résistance à la fatigue ;
- d'un revêtement à base de nanotubes de carbone super noir capable d'absorber près de 99,96 % de la lumière pour des systèmes sensibles, tels que les caméras infrarouges, les satellites d'observation de la terre ou les détecteurs anti-missiles ;
- de nano-capteurs en technologie flexible ;
- d'architectures de communication sans fils reconfigurables à faible consommation et forte immunité contre les interférences.

Hypothèses

Hypothèse 1. Pas d'innovation, statu quo

Du fait de financements nationaux et européens, la R&D propose des innovations mais, en France, les verrous que sont la faisabilité industrielle, la réglementation et l'acceptabilité par le consommateur font que l'utilisation des nanomatériaux reste marginale. Seuls les nanomatériaux « historiques » restent présents. Pour autant, la filière nautique/naval reste compétitive du fait d'autres innovations et facteurs. Il en est de même pour le secteur aérospatial. L'industrie française automobile stagne, de même les constructeurs étrangers.

Hypothèse 2. Innovation et développement dans certains secteurs

Du fait de financements nationaux et européens, la R&D propose des innovations, la filière nautique/navale se mobilise et enrichi son savoir-faire : l'industrie devient le leader mondial. Il en est de même pour le secteur aérospatial. En ce qui concerne l'automobile, faute d'investissement des constructeurs, le génie des matériaux fait toujours face à de nombreux défis comme par exemple la mise en forme de produits d'architectures élaborées en vue d'une performance mécanique accrue allée à une diminution

significative du poids. L'industrie de l'automobile est en baisse en France alors que les constructeurs étrangers ont pris efficacement le virage.

Hypothèse 3. Innovation via les fournisseurs

Du fait de financements nationaux et européens, la R&D propose des innovations, et les filières de l'automobile, aérospatiale et nautique/navale mobilisent efficacement leurs efforts (y compris de manière transversale) sur l'évolution des performances et permettent d'enrichir le savoir-faire français. Concernant le nautique/naval, du fait des exportations toujours croissantes, l'industrie française devient le leader mondial. Après plusieurs années de chute de la production, l'industrie française de l'automobile se redresse. Il y a donc conception, intégration et assemblage en France.

Références

- Les réalités industrielles dans le domaine des nanomatériaux en France. Analyse de la réalité du poids des nanomatériaux dans la filière industrielle concernée. Direction générale de la compétitivité de l'industrie et des services du ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie (DGCIS, MINEFI). 19 juin 2012.
- L'industrie automobile française. Analyse et statistiques 2013. Comité des constructeurs français d'automobiles.
- Mohseni, M., Ramezanzadeh, B., Yari, H., Gudarzi, M.M. (2012). The Role of Nanotechnology in Automotive Industries, *New Advances in Vehicular Technology and Automotive Engineering*, Prof. Joao Carmo (Ed.), ISBN: 978-953-51-0698-2, InTech, DOI: 10.5772/49939.
- Nanotechnology. Nanomaterials are widely used in commerce, but EPA faces challenge in regulating risks. United States Government Accountability Office. May 2010.
- Coelho, M.C., Torrao, G., Emami, N., Gracio, J. (2012) Nanotechnology in automotive industry: research strategy and trends for the future. Small objects, Big impacts. *Journal Nanoscience and Nanotechnology*, 12:6621-6630
- Chiffres clés du nautisme 2011/2012. Fédération des industries nautiques. Édition 2013.
- Stratégie des filières navale et nautisme en Bretagne. Bretagne Développement Innovation. Édition 2013.
- Presting, H., König, U. (2003). Future nanotechnology developments for automotive applications. *Materials Science and Engineering C* 23, 737–741.
- ObservatoryNano Briefing November 2011. Transport: Nanotechnology in automotive tyres.
- Nanotechnologies in Automobiles. Innovation Potentials in Hesse for the Automotive Industry and its Subcontractors. Hessen-Nanotech series of publications, December 2008.
- Applications of Nanotechnology in Space Developments and Systems. Technological Analysis. Future Technologies No. 47. Düsseldorf, April 2003.

L'électronique

Stéphane Binet, INRS

Définition

Les composants et systèmes électroniques participent actuellement à quasiment toutes les activités industrielles et commerciales, ainsi que de nombreux objets de nos vies quotidiennes. Il n'est plus possible d'en dresser une liste exhaustive : communications, informatique, traçabilité (puces RFID), automatismes, robots, sécurité des biens et des personnes, santé, transports...

En 2010, Laurent Malier (rapport de mission au ministre chargé de l'Industrie) estimait que la France possédait un positionnement industriel solide dans le domaine de la micro-nanoélectronique capable de saisir « *les opportunités de croissance dans le domaine des composants semiconducteurs et des secteurs applicatifs associés, notamment ceux de l'énergie, des transports et de la santé, secteurs dont les enjeux économiques et de souveraineté vont fortement se renforcer dans les décennies à venir* ». On se référera utilement à ce rapport pour la carte des sites industriels français de production. Il était aussi estimé que les sites industriels français, pris comme un ensemble, étaient à l'état de l'art mondial en termes de compétitivité de l'offre.

La tendance actuelle en recherche et développement relève de la miniaturisation des composants microélectronique jusqu'aux tailles nanométriques tout en restant dans les limites classiques de la physique : les transistors actuels sont fabriqués à partir de technologies 32 nm ou inférieure. Au-delà, le domaine de la nanoélectronique apparaîtra permettant de miniaturiser encore et d'exploiter des effets physiques nouveaux lorsque certains composants des systèmes électroniques seront de dimension nanométrique. La nanoélectronique représente un enjeu technologique et commercial majeur à l'horizon 2020-2030, c'est-à-dire aujourd'hui dans les laboratoires de recherche.

Indicateurs pertinents et données de l'évolution de la variable

Au niveau mondial, le chiffre d'affaires du secteur micro-nanoélectronique était d'environ 230 milliards d'euros en 2012 et la valeur des produits serait d'environ 1 600 milliards d'euros (CESE, 2013).

Le niveau de l'Union européenne (UE) est le bon niveau de coordination pour organiser la transversalité, éviter les redondances dans les recherches et mobiliser les chaînes de valeur, et commercialiser leurs résultats dans les meilleures conditions. S'agissant d'un domaine vital pour l'économie de l'Europe, la micro et nanoélectronique méritent une véritable politique industrielle commune bénéficiant d'un effet de masse afin de transformer la recherche en produits commercialisables. Cela seul permettra de rattraper le retard et soutenir la comparaison avec les États-Unis et l'Asie (CESE, 2013).

D'après la Commission européenne, il est stratégique de relocaliser en Europe les parties manquantes de la chaîne de valeur des technologies micro- et nanoélectroniques après 10 ans de stagnation dans les budgets de la R&D&I européenne qui ont empêché l'Union d'occuper toute sa place sur les marchés mondiaux (transfert massif de la production vers l'Asie). La Commission propose de développer une nouvelle stratégie industrielle européenne pour l'électronique en préconisant des investissements publics coordonnés et des partenariats public-privé aux fins de mobiliser 10 milliards d'euros de nouveaux investissements publics et privés dans les « technologies avancées ». La Commission appelle donc le secteur privé à s'engager : en effet, la course aux marchés exige des investissements que les États membres, en crise et en proie aux coupes budgétaires exigées par l'UE, ne peuvent plus fournir. Neuf principales catégories de produits contribuent particulièrement à l'innovation et la compétitivité :

1. ordinateurs,
2. périphériques d'ordinateur et autres matériels de bureau,
3. électronique grand public,
4. serveurs et appareils de stockage,
5. équipements de travail en réseau,
6. systèmes électroniques automobiles,
7. dispositifs médicaux électroniques,
8. matériel électronique industriel,
9. matériel électronique militaire et aérospatial.

Dans les quatre premières catégories de produits, une seule entreprise européenne figure parmi les leaders mondiaux. La présence européenne est plus importante dans les autres secteurs, mais l'Europe ne bénéficie d'une position dominante dans aucun d'entre eux (CESE, 2013).

En France et depuis une vingtaine d'années, des plans microélectroniques ont été lancés avec comme point d'appui principal la région Rhône-Alpes (Crolles dans l'Isère). Depuis 2003, le réseau Renatech des grandes centrales de technologie pour la Recherche technologique de base (RTB), associant le CNRS, des universités et le CEA Leti, joue un rôle important au profit des laboratoires français dans les domaines des micro-nanotechnologies et nanosciences. La communauté scientifique française, couvrant un large champ de compétences, est bien positionnée au niveau européen et s'est fortement impliquée dans les principaux programmes du 7^{ème} Programme cadre de recherche et développement (PCRD). Autour des acteurs majeurs, STMicroelectronics au plan industriel et le CEA Leti pour l'intégration « pré-industrielle », les laboratoires peuvent relever les défis de l'accompagnement de la fin de la loi de Moore (CNRS, 2011).

La « stratégie nationale de recherche et d'innovation » (SNRI), qui a été élaborée en 2009, avait identifié les nanotechnologies et les biotechnologies comme des priorités. La SNRI a servi de guide pour la définition des programmes de financement et la priorisation des investissements. En juillet 2013, un vaste programme de recherche et de développement industriel de 3,5 Md€ Nano2017, avec une participation de l'État à hauteur de 600 M€ a été lancé pour le développement de nanoélectronique. Ce projet est porté par la société STMicroelectronics, le laboratoire Leti du CEA à Grenoble et leurs partenaires locaux. Le plan nanoélectronique est l'un des 34 plans industriels décidés en septembre 2013 par le gouvernement (<http://www.redressement-productif.gouv.fr>).

En dépit de la crise économique, les dépenses de R&D des entreprises dans le secteur des nanotechnologies sont en constante augmentation. L'analyse réalisée par le Service d'information et études statistiques du MESR (SIES) montre que l'essentiel de la R&D en nanotechnologie en France (environ 67 %) est tourné vers la fabrication de composants, cartes électroniques et équipements périphériques (CGEJET, 2014).

Rétrospective

L'invention du transistor (1947), puis du circuit intégré (1958) déclenchent l'innovation électronique au début des années 1960 avec l'avènement des circuits intégrés en technologie CMOS silicium (*Complementary metal oxide semiconductor*; le transistor MOS est l'élément fondamental des circuits intégrés). Depuis cette date, et encore maintenant, les applications de la microélectronique sont conditionnées par la réduction de la taille des composants permettant leur intégration poussée et augmentant la puissance et l'étendue des fonctions. Cette réduction en taille s'est accompagnée d'une réduction considérable du coût d'un transistor unitaire et d'une augmentation de leur nombre par unité de surface respectant la « loi » ou plutôt la conjecture que Gordon Moore, ingénieur chez Intel, a énoncé en 1975 : le nombre de transistors intégrés sur une puce double tous les 18 mois. Les applications se sont étendues à tous les grands secteurs économiques : traitement de l'information, communications, énergie, santé, contrôle industriel, transports, défense, environnement...

L'évolution des technologies de fabrication des circuits intégrés sur silicium a permis de réaliser des systèmes microélectroniques intégrés sur une même puce dits SoC (*System on chip*) qui peuvent intégrer sur une surface de quelques cm² plusieurs milliards de transistors avec des longueurs de grille de 28 à 22 nm en technologie CMOS. Actuellement, ces technologies sont présentes dans la totalité des équipements liés aux technologies de l'information et de la communication : ordinateurs personnels, téléphones mobiles, assistants numériques personnels, navigateurs GPS...

L'électronique organique, quant à elle, utilise des semi-conducteurs basés sur la chimie du carbone. Ses applications concernent les diodes électroluminescentes (OLED), les cellules photovoltaïques (OPV), les transistors à effet de champ (OFET) et les capteurs. Selon IDTechEx dans son rapport *Organic & Printed Electronics Forecasts, Players &*

Opportunités 2007-2027 (CNRS, 2012), « ...peu d'autres technologies auront sur le secteur un impact aussi important dans les vingt prochaines années. Sous forme d'applications pour les emballages intelligents, les panneaux électroniques, les affiches, les signaux et les livres électroniques, l'électronique organique va influencer sur les secteurs de l'imprimerie et de l'édition conventionnelle. L'éclairage organique va impacter les ventes du secteur de l'éclairage, l'incandescent comme le fluorescent ». L'électronique organique présente aussi l'avantage d'une mise en œuvre avec des moyens de production bas coûts par des petites unités de production.

Une part importante des recherches actuelles concerne notamment l'autonomie et la consommation énergétique des systèmes électroniques, leur fiabilité...

Tendances d'évolution de la variable

Le CESE (2013) estime que *« les composants et systèmes micro-nanoélectroniques peuvent être à la base d'une nouvelle révolution industrielle. Dans ce contexte, le régime des aides d'État et des subventions (européennes) doit être modifié car le problème auquel sont confrontées les industries européennes de haute technologie n'est pas la concurrence entre entreprises européennes, mais plutôt l'absence, dans de nombreux secteurs de haute technologie, d'entreprises compétitives et leaders sur le plan mondial. Les véritables faiblesses de l'Europe sont le manque de produits et de présence sur le marché, ainsi que la pénurie d'entreprises d'envergure mondiale. »*

Prospective

Les déterminants de l'évolution future de la variable dépendent en majeure partie de la disponibilité applicative des recherches actuelles et futures en nano-électronique dans les secteurs suivants (AENEAS, 2012) :

- santé, vieillissement démographique et bien-être : dépistage et diagnostic précoce, suivi thérapeutique et post-thérapeutique, réseaux de télésurveillance recueillant les informations de nanocapteurs corporels... (amélioration du pronostic des patients et réduction ou stabilisation du coût de la santé) ;
- sécurité alimentaire et agriculture durable : nanocapteurs
 - garantissant la comestibilité d'un aliment, assurant la qualité, la fiabilité et la traçabilité des opérations de fabrication ;
 - permettant le développement de souches de plantes résistantes aux maladies et aux conditions climatiques défavorables ;
 - permettant de contrôler la présence et le degré de biodégradation des pesticides, herbicides et engrais ;
- énergie sûre, propre et efficace : la nanoélectronique permettra de réduire la consommation d'énergie dans de nombreux secteurs, d'apporter une plus grande intelligence de la distribution d'énergie (*smart grid*) dans les espaces publics et privés, et l'automatisation industrielle, de réduire le coût des sources d'énergie renouvelables ;

- transport intelligents, verts et intégrés : systèmes permettant le contrôle automatique de la vitesse et la prévention des collisions, l'optimisation de la consommation de carburants...
- optimisation des ressources et action pour le climat : production d'énergie et efficacité énergétique ; recyclage et réduction des déchets ; contrôle des émissions et contrôles environnementaux ;
- information et sécurité : systèmes d'informations dédiées, systèmes de contrôle pour la sécurité des personnes et le contrôle des environnements domestiques ;
- défense.

Plus en amont, il sera nécessaire de favoriser les recherches sur :

- les outils unifiés pour la modélisation, la simulation et la conception de systèmes nano-électroniques ;
- les outils pour la nanofabrication incluant les problématiques industrielles telles que la reproductibilité, le contrôle des procédés et les possibilités de co-intégration avec les technologies existantes (CNRS, 2011) ;
- le recyclage (ou la substitution) des métaux stratégiques nécessaires à la fabrication des systèmes (Commission européenne, 2014) : terres rares, platine, gallium, indium... À noter, qu'en France, le ministère chargé de l'Industrie a créé un Comité pour les métaux stratégiques (COMES), par décret du 24 janvier 2011. Il s'agit d'un organe d'analyse et de dialogue sur les métaux stratégiques réunissant les représentants de différents ministères et des établissements publics concernés, les fédérations professionnelles et certaines entreprises liées au secteur minier.

Il est aussi important de ne pas oublier les recherches sur l'impact des nanotechnologies dans la société : répercussions sociales éthiques et légales, économiques sur l'emploi, sur l'environnement, la santé, la sécurité, les méthodes d'enseignement, l'information du grand public (CNRS, 2011).

Hypothèses

Les hypothèses d'évolution de la variable dépendent en majeure partie :

- du renforcement du couplage européen entre laboratoires de recherche et industriels de chaque secteur concerné avec la création de groupes de recherches pluridisciplinaires associant des chercheurs et universitaires mais également des personnels de la R&D industrielle ;
- du contexte économique et financier susceptible d'influer sur le financement de politiques européennes ou nationales de soutien à la recherche privée ou publique et à l'industrie avec pour conséquence une plus ou moins grande dépendance vis-à-vis des brevets étrangers et des importations ;

- de produits créateurs de richesse (gains de productivité, économies d'échelles...) intégrant de la nano-électronique dans les secteurs évoqués supra ;
- de l'acceptabilité sociale.

Hypothèse 1. Investissements massifs dans la recherche

L'Europe et les États la constituant tirent l'essentiel de leur croissance des produits à composantes nanotechnologiques qui permettent de la/les sortir de la crise sur deux aspects complémentaires :

- les brevets issus d'une recherche fortement stimulée par les politiques publiques permettent de fabriquer des produits avec un bénéfice optimal (pas de paiement de royalties) ;
- les dispositifs à composante nanotechnologique permettent une amélioration globale de la rentabilité dans tous les secteurs économiques traditionnels (santé, transports, sécurité, information, optimisation des ressources...).

Cette hypothèse suppose notamment un accès (sans contraintes) aux métaux stratégiques.

Hypothèse 2. Peu de recherches en France

Pas d'amélioration du contexte économique et financier associée à une insuffisance du couplage européen en termes de R&D public/privé avec, pour conséquence, l'augmentation de la dépendance en brevets étrangers. La part de croissance liée aux nanotechnologies est sous-optimale par rapport à celle observée dans les pays se consacrant à une forte stimulation de ce secteur : elle est restreinte au développement des applications (optimisation de l'existant) et à l'utilisation de systèmes électroniques intégrant des nanos.

Hypothèse 3. Limitation des usages de la nano-électronique

Une faible acceptabilité sociale s'installe liée 1) aux incertitudes associée aux effets sanitaires et environnementaux ou 2) au risque d'utilisation d'informations recueillies par des dispositifs nanotechnologiques. Ces dispositifs sont susceptibles de se généraliser à toutes les activités des gens avec, pour conséquence, le risque de recueil et conservation d'informations beaucoup plus large que celui prévu pour le dispositif : l'exemple actuel étant les puces RFID *Radio frequency identification*, marquage de produits pour accélérer le passage aux caisses des magasins versus historisation des données de consommation par individu. Ceci peut entraîner un rejet social dû à la crainte (légitime) de perméabilisation de la sphère privée (un exemple récent : l'affaire des écoutes de la NSA). L'évolution de cette hypothèse est très dépendante de l'encadrement réglementaire des données de traçabilité ainsi que des paramètres de conservation des données personnelles recueillies.

Références

- AENEAS, 2012. Innovation for the future of Europe: Nanoelectronics beyond 2020. Association for European NanoElectronics Activities, november 2012.
- CGEJET, 2014. Rapport sur le déploiement industriel des nanotechnologies et de la biologie de synthèse sur les territoires, précurseur des manufactures du futur. Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies.
http://www.cgeiet.economie.gouv.fr/Rapports/2014_03_20_nano_et_Biologie_de_synthese_deploiement_industriel.pdf
- CESE, 2013. AVIS du Comité économique et social européen sur la "Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. Stratégie européenne en matière de composants et systèmes micro-nanoélectroniques" COM(2013) 298 final.
- CNRS, 2011. Rapport de conjoncture du Comité national de la recherche scientifique, chap. 8 : Micro et nano-technologies, électronique, photonique, électromagnétisme, énergie électrique. CNRS Éditions, 15 rue Malebranche, 75005 Paris.
http://www.cnrs.fr/comitenational/doc/rapport/2010/Rappconj_2010_interactif.pdf
- CNRS, 2012. Rapport de prospective du groupement de recherche SoC-SiP.
http://www.lirmm.fr/soc_sip/
- Commission européenne, 2010. Critical raw materials for the EU.
- Malier Laurent. Les sites français de production micro-nanoélectronique. Mission confiée par Christian Estrosi, ministre chargé de l'Industrie. Éditeur : ministère de l'Industrie, juillet 2010.

La défense

Éric Gaffet, Institut Jean Lamour

Définition

Cette fiche traite de la conception, de la production et de la mise en œuvre des nanomatériaux (y compris composants de capteurs, devices, actuateurs) dans le domaine de la défense.

Les domaines de la défense et de la sécurité ont toujours été précurseurs en termes de mise en œuvre de nouvelles avancées technologiques et scientifiques. Que ce soit sous forme de *smart dusts* ou encore « poussières intelligentes » permettant de surveiller de façon passive une zone géographique (mouvements de sols, changement de température, modification de la composition chimique de l'air ambiant) aux robots, notamment des drones (terrestres, aériens, nautiques) susceptibles d'accomplir en quasi-autonomie leurs missions, les développements des nanotechnologies et des nanomatériaux sont incontournables. En termes de protection active et passive des forces armées et/ou de sécurité, l'emploi de nanomatériaux est d'ores et déjà mis en œuvre.

Les nanotechnologies vont révolutionner le monde de l'armement dans les prochaines années¹. Miniaturisation, intégration de l'homme aux systèmes d'armes, robotisation sont envisagées afin de rendre le matériel militaire plus performant. Le combattant deviendra selon cette perspective, un des éléments du système d'armes : il ne sera plus ainsi équipé, mais dit « intégré » comme par exemple ceci est envisagé en France, dans le cadre du système combattant FELIN. C'est ainsi que le fantassin à liaison intégrée (FELIN) est appelé à être le soldat français du futur avec de l'électronique, des capteurs, des senseurs, des fibres nano-structurées, des vêtements de camouflage actif à absorption des ondes lumineuses (les premiers systèmes FELIN ont été livrés à l'armée de terre française en 2010, au 1^{er} régiment d'infanterie implanté à Sarrebourg).

¹ Institute for soldier nanotechnologies - <http://isnweb.mit.edu/> (consulté le 15 mai 2014).



Figure 1. FELIN le fantassin du futur.

En France, la plupart de ces innovations technologiques sont le fait de sociétés privées comme Thalès ou encore STMicroelectronics, leader mondial des semi-conducteurs et des systèmes sur puce.

Pour coordonner et piloter les recherches dans ces domaines en France, la Délégation générale pour l'armement a investi dans des recherches dites amont².

La DGA est une direction du ministère de la Défense, agissant dans le but d'assurer la défense ultime des intérêts vitaux de la Nation contre toute menace qu'elle qu'en soit l'origine, la défense des intérêts stratégiques du pays ainsi que ceux correspondant à ses responsabilités internationales et à sa position dans le monde.

Les trois missions essentielles de la DGA sont les suivantes :

Équiper les forces armées

Maître d'ouvrage des programmes d'armement, la DGA est responsable de la conception, de l'acquisition et de l'évaluation des systèmes qui équipent les forces armées. Son action couvre toute la durée de vie de ces programmes :

- 1^{er} investisseur de l'État ;
- La DGA conduit 80 programmes d'armement ;
- 10,835 milliards d'euros de paiement à l'industrie pour les programmes en 2013.

Préparer l'avenir

Imaginer les futurs possibles, anticiper les menaces et les risques, préparer les capacités technologiques et industrielles, dans un cadre résolument européen :

- 1^{er} acteur de la recherche de défense en Europe ;
- 776 millions d'euros de contrats d'études notifiés à l'industrie en 2013.

² *L'armement du futur : pression sur la recherche. Présence militaire dans le secteur des nanotechnologies*, Antonin Reigneaud, Observatoire des transferts d'armements/CDRPC, juin 2006. <http://www.obsarm.org/news/2006/Dossier%20nanotechnologie.pdf>

Promouvoir les exportations d'armement

Contribuer activement à ce volet majeur de la politique industrielle tant sur l'aspect contrôle pour le respect des engagements internationaux de la France que sur l'aspect économique pour le développement des entreprises de défense :

- un partenaire majeur pour le développement international des entreprises françaises ;
- les exportations d'armement représentent 1/3 de l'activité des entreprises françaises du secteur ces dix dernières années ;
- 6,3 milliards d'euros de prises de commandes export en 2013 (estimation, le montant définitif des prises de commandes sera publié dans Le rapport au Parlement sur les exportations d'armement de la France, en 2014).

Intérêt des nanotechnologies pour la DGA³

- Allègement et diminution de la vulnérabilité du matériel, par l'utilisation de matériaux plus légers, plus résistants et dits intelligents (*Smart Materials*).
- Développement de matériaux énergétiques innovants.
- Augmentation des performances humaines via des systèmes de surveillance physiologique ou par l'intégration de microsystèmes biologiques.
- Amélioration de la maîtrise de l'information par l'utilisation de capteurs abandonnés (capteurs de détection, d'acquisition et de traitements des informations, etc.).
- Robotisation accrue sur le champ de bataille.
- Amélioration des soins médicaux en collaboration étroite avec le domaine des biotechnologies : sang artificiel, traitement des brûlures, biomatériaux, neuroprotection, etc.

Ainsi le domaine des nanotechnologies offre un spectre d'applications potentielles qui s'étend à la quasi-totalité des domaines techniques.

La DGA liste ainsi des évolutions technologiques structurant l'avenir de l'armement :

- **miniaturisation** : le développement de micro-nanosystèmes devrait permettre le développement d'architectures innovantes de systèmes d'armes ;
- **robotisation** : dans le but d'épargner les vies humaines, les efforts pour rendre les systèmes de plus en plus autonomes seront poursuivis (robots terrestres, drones, etc.) ;
- **conception de métasystèmes** : l'interconnexion généralisée de systèmes (de communication, d'information, de décision, etc.) conduira à développer des systèmes de systèmes, à l'image du concept d'opérations réseaux centrées ;
- **électrification** : la tendance générale au recours à l'électricité pour toutes les fonctions des systèmes d'armes impliquera des progrès importants dans le domaine de la génération et du stockage de cette énergie ;

³ Site internet de la DGA : <http://www.defense.gouv.fr/dga> (consulté le 15 mai 2014)
et <http://www.defense.gouv.fr/dga/innovation2/prospective/le-plan-prospectif-a-30-ans-pp30>

- **recours généralisé aux technologies numériques** : extension du domaine des techniques informatiques avec le développement de fonction de reconfiguration automatique du signal numérique et de résistance aux pannes ;
- **intégration de l'homme** : le soldat fera partie du système, grâce à des capteurs et des calculateurs intégrés au plus près de lui et des sources d'énergie miniaturisées (convergence des biotechnologies et des nanotechnologies, prothèses sensorielles, etc.) ;
- **mise en réseau** : la généralisation des communications sans fil aura un fort impact sur la gestion des fréquences radios et sur leur sécurité informatique (lutte informatique défensive, technique de cryptage, etc.) ;
- **recours à l'espace** : les spécificités de l'espace (couverture mondiale, utilisation en toute souveraineté sans enfreindre les droits des États, etc.) accentuent l'intérêt pour ce domaine.

Rétrospective

Évolution des applications

Surveillance passive aux *smart dusts*

L'usage des capteurs passifs pour surveiller l'environnement a fait l'objet d'une mise en œuvre intensive par l'armée américaine pendant la guerre du Vietnam⁴. Il s'agissait alors de mettre en place la ligne Mac Namara du nom du Secrétaire à la Défense américain Robert S. Mc Namara. Cette ligne était constituée de près de 20 000 capteurs largués par avion ou hélicoptère. Capteurs sismologiques pour leur majorité, ils permettaient ainsi de détecter les vibrations du sol induites par le déplacement des troupes nord-vietnamiennes ou leurs véhicules terrestres. Ces capteurs ressemblaient pour certains à des végétaux, afin de ne pas être repérés.

Le milieu des années 2000 a vu le développement et la commercialisation de puces RFID à dimensions particulièrement réduites. Dans le domaine du marquage et de l'identification, il est important de souligner les réalisations d'ores et déjà opérationnelles. A titre d'illustration, en 2006,



Figure 2. Capteur sismologique de la ligne Mc Namara (1966).

⁴ <http://www.afa.org/magazine/Nov2004/1104igloo.asp>

Hitachi a présenté la plus petite puce RFID jamais réalisée. Ses mensurations (0,05 x 0,05 mm²) lui ont valu le nom de « poudre » (ou encore *smart dust*). Elle contient une ROM de 128 bits permettant de stocker un numéro d'identité de 38 chiffres et peut être facilement intégrée dans une feuille de papier. Pour rappel, une puce RFID (*Radio Frequency Identification*) permet une identification automatique du contenu qu'elle transporte. Les puces RFID peuvent contenir toute sorte d'information et se trouvent sur moult supports allant du passeport aux étiquettes de produits vendus en supermarché en passant par des billets de concert. L'apparition de poudre de RFID permet de faciliter leur intégration sur de plus en plus de supports. Parallèlement à ces développements, une société britannique a développé un dispositif permettant de localiser de telles puces RFID jusqu'à une distance de 180 mètres⁵ et dans un volume à trois dimensions avec une précision de 2 cm. Une telle miniaturisation conduit certains à s'interroger sur la notion de traçabilité de l'individu et du contrôle à son insu.

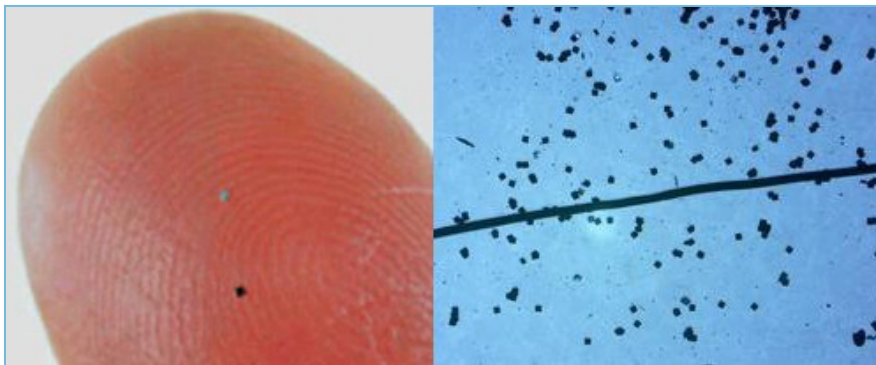


Figure 3. <http://www.presence-pc.com/actualite/RFID-poudre-Hitachi-21816>.

■ Une puce RFID de 0,15 mm de côté et 7,5 µm d'épaisseur

En février 2006, Hitachi avait réussi à commercialiser une puce RFID de 0,15 mm de côté et 7,5 µm d'épaisseur. La puce du périphérique embarque un capteur d'image 16 000 pixels et un algorithme câblé permettant de traiter 1 000 images par seconde. Elle mesure 3,3 x 3,5 mm² et peut être embarquée sur un circuit imprimé de seulement 5,5 cm². Sa petite taille permet un coût de fabrication réduit de 1 000 yens (6,17 euros) environ. Comparé à un capteur CCD, la résolution est beaucoup plus faible (16 000 pixels contre plusieurs millions) mais le traitement de l'image est réalisé instantanément sur une petite surface alors que dans le cas du CCD, le capteur est souvent relié à une machine plus grosse capable d'effectuer des traitements. Des capteurs analysant instantanément la position et la taille existaient déjà ; cette fois-ci le capteur est capable de déterminer la forme et l'inclinaison également⁶.

■ Une micro-puce aussi petite qu'un grain de riz⁷

Les laboratoires Hewlett Packard de Bristol ont mis au point en quatre ans une micro-puce de 2 x 4 mm capable de contenir jusqu'à 512 kilobytes de données, soit environ l'équivalent d'une centaine de pages de texte. Les données de cette puce peuvent être transmises par réseau sans fil à une vitesse de 10 Mb par seconde. Cette puce pourrait être incorporée facilement dans des objets et être utilisée par exemple pour identifier les composés pharmaceutiques et dans les hôpitaux afin

⁵ <http://www.tfot.info/pod/152/rfid-loc8tor.html>

⁶ Nikkei - 23/08/2007 : <http://www.nni.nikkei.co.jp/AC/TNKS/Nni20070919D18JS>

⁷ <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/39018.htm>

d'enregistrer les médicaments que le patient a reçus. Il serait aussi possible de l'incorporer à des livres afin de faciliter l'impression des pages de celui-ci. De plus, cette puce ne nécessite pas de batteries car les dispositifs de lecture de la puce fourniront l'énergie par induction.

- **Hitachi vient de présenter la plus petite puce RFID jamais réalisée⁸**
Ses mensurations (0,05 x 0,05 mm²) lui ont valu le nom de poudre. 150 micromètres x 150 micromètres x 7,5 micromètres !! Cette puce est tout de même 64 fois plus petite que la plus petite puce avant elle et 9 fois plus petite que le prototype présenté par Hitachi l'année dernière. Elle contient une ROM de 128 bits permettant de stocker un numéro d'identité de 38 chiffres et peut être facilement intégrée dans une feuille de papier.

Robotisation, drones

Les dernières interventions américaines en Afghanistan et Irak ont montré la sensibilité extrême de l'opinion publique aux décès des combattants obligeant une révision de l'engagement de ceux-ci, au bénéfice d'autres dispositifs robotisés.

En 2011, en Afghanistan, il y avait déjà plus de 2 000 robots, incluant les robots détecteurs d'engins explosifs (War Machines: Recruiting Robots for Combat. New York Times, nov. 2010) et permettant de les désactiver.

Toujours en avril 2011, la Marine américaine a conçu un bombardier (le X – 47B), avion à pilotage automatique, capable de rechercher et trouver sa cible sans aide humaine, alors que les drones classiques ont encore besoin de l'intervention d'un pilote (Source : War of the machines? April 6, 2011 – CNN, Apr 4, 2011).

Nanomatériaux et armement^{9,10}

Il convient également de souligner que les nanotechnologies et les nanomatériaux comportent un développement très nettement dual en termes d'intégration dans les domaines d'applications spécifiques de la défense. Il en est ainsi des protections individuelles (gilets ou casques pare-balles à base de nanotubes de carbone), des dispositifs de détection très rapides et ultrasensibles, des vectorisations chimiques et bactériologiques, des exosquelettes (prothèses externes commandées par les mouvements du combattant devant lui permettre de porter 80 kg pendant 80 km à plus de 50 km/h. Objectif de la DARPA, USA), tout comme dans le développement de bombes thermobariques¹¹ mettant en œuvre des nanoparticules pyrophoriques et développant des effets de souffle localement équivalents à une arme nucléaire¹² ; les

⁸ Sources : BBC, press release, 17/07/06, <http://news.bbc.co.uk/1/hi/technology/5186650.stm>

⁹ *Nanomatériaux : différentes voies de synthèse, propriétés, applications et marchés*. E. Gaffet, adsp n° 64 septembre 2008, pp 18–23.

¹⁰ *Augmentation des performances humaines avec les nouvelles technologies : Quelles implications pour la Défense et la Sécurité ?* Jean Didier Vincent, Arnaud de la Lance, Bernadette Bensaude - Vincent, Éric Gaffet, Xavier Bigard, Louis Laurent, Michel Detilleux, Michel Peres, Régis Guillemaud, Virginie Tournay, Yann Perrot, Agnès Colin – DGA / Club de réflexion et de recherche de l'IRSEM, Institut de recherche stratégique de l'École militaire, mars 2010.

¹¹ Une arme thermobarique est une arme explosive, qui combine des effets thermiques, d'onde de choc et de dépression.

¹² <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/6990815.stm>

premiers essais ont été conduits par les USA et la Russie dès 2007. Cet aspect dual persuasif des nano-applications conduit à s'interroger au niveau international sur la réactualisation des dispositifs et traités relatifs à la non-prolifération d'armes de destruction massive.

Technologie duale, R&D et industrialisation

La Défense souhaite que l'ensemble des domaines tire parti de la dualité civil – militaire. Compte tenu du niveau technologique de plus en plus élevé des produits civils et de leur courte durée de développement au regard de celle des produits pour applications militaires, le domaine civil est devenu aujourd'hui un moteur de l'innovation. C'est donc en s'orientant vers l'exploitation le plus amont possible des applications civiles que la Défense se tourne afin d'obtenir de meilleures performances, des réductions de coûts et de délais tout en garantissant la disponibilité des meilleurs technologies¹³.

Le Premier ministre, Jean-Marc Ayrault, Arnaud Montebourg, ministre du Redressement productif, Geneviève Fioraso, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et Fleur Pellerin, ministre chargée des PME, de l'Innovation et de l'Économie numérique, ainsi que plusieurs représentants des autorités nationales, régionales et locales, et des dirigeants de STMicroelectronics, se sont retrouvés le 22 juillet 2013 sur le site ST de Crolles, près de Grenoble (Isère), pour le lancement du programme de R&D Nano2017¹⁴.

Le Premier ministre a annoncé la participation de l'État à hauteur de 600 millions d'euros au programme Nano2017 pour un coût total de 3,5 milliards d'euros. Il doit se traduire par la réalisation d'importants investissements industriels de haute technologie en France par STMicroelectronics, notamment dans son usine de Crolles. STMicroelectronics investira lui-même 1,3 milliard d'euros qui devrait lui permettre de doubler la capacité de production de cette usine. Celle-ci va passer de 3 500 tranches de silicium par semaine à 7 000 à terme, avec une étape intermédiaire de 5 700 tranches par semaine.

Le projet bénéficie du soutien de l'Union européenne par le biais de l'initiative technologique commune (ITI) de l'Eniac, le Conseil consultatif pour l'initiative européenne des nanotechnologies.

Le programme Nano2017 doit renforcer le leadership de STMicroelectronics dans les technologies-clés : FD-SOI (traitement de hautes performances et basse consommation), imagerie de nouvelle génération (capteurs et processeurs de signal d'images) et mémoires non-volatiles embarquées de nouvelle génération. Ces technologies sont au cœur des solutions de traitement embarquées de ST, telles que les microcontrôleurs, les solutions d'imagerie, les produits numériques grand public, les processeurs d'application et les Asic numériques.

¹³ <http://www.challenges.fr/entreprise/20140415.CHA2751/comment-la-recherche-militaire-irrigue-l-industrie-francaise.html>

¹⁴ <http://rpdefense.over-blog.com/tag/Nanotechnologie>

Nano2017 s'inscrit dans une vision européenne, avec le programme Airbus of Chips de 10 milliards d'euros sur 7 ans lancé par la Commission européenne, qui vise à doubler la production en Europe de puces "moins coûteuses et plus intelligentes" pour atteindre 20 % de la production mondiale. Le site de Grenoble-Crolles sera l'un des trois piliers, avec les pôles d'innovation de Dresde en Allemagne, et Eindhoven-Louvain aux Pays-Bas et en Belgique, de cette stratégie microélectronique européenne ambitieuse.

Les déterminants de cette variable sont l'acceptabilité sociétale de l'usage des dispositifs autonomes à capacité de décision ultime sans intervention humaine (éthique du combattant ?), le coût des dispositifs et enfin, la question de l'homme amélioré / augmenté.

Hypothèses

Hypothèse 1. Développement tendanciel des nanomatériaux

Selon le modèle de conflits (étendus, localisés en zone urbaine) et l'ampleur de ces conflits (longue distance, intervention immédiate), les nanomatériaux (blindage, capteurs *smart dusts*, robots et drones) et les nanosystèmes électroniques (drones autonomes, communications et observations par satellites) deviendront incontournables, et donc de plus en plus classiques et intégrés aux équipements militaires actuels.

Un point important est la mise en œuvre de ces nanotechnologies pour « réparer » les combattants blessés sur les champs d'opération. Les forces armées américaines sont parmi les plus importants soutiens de développement de « l'Homme réparé » avec bon nombre d'associations d'anciens combattants proactifs.

Hypothèse 2. Développement modéré ou ralenti

Cette hypothèse peut se rencontrer avec la conjonction de l'impact de trois paramètres : le coût de fabrication, le niveau de risques et l'utilité :

- un fort coût de fabrication, peu de risques, une grande utilité,
- un faible coût de fabrication, des risques possibles, une grande utilité,
- un faible coût de fabrication, des risques possibles, une faible utilité.

Si la nature des conflits reste régionale, voire très localisée, à faible impact pour les grandes puissances et sur leur opinion publique, la nécessité de s'engager pour eux, restera faible. Le surcoût lié à l'usage de nanotechnologies et nanomatériaux ne se justifiera pas d'un point de vue économique-stratégique.

Hypothèse 3. Arrêt du développement

Cette hypothèse suppose un fort coût, des risques possibles et une faible utilité.

En fonction des pays et de leur capacité de financement (recherche et développement d'industrie duale), cette hypothèse pourra ou non s'avérer pertinente.

Typiquement, le développement pour la défense et la sécurité ne pourra se faire que si des applications duales (civiles) sont capables de supporter le coût du développement des applications militaires. Cela suppose qu'une industrie forte dans les domaines des matériaux et de l'électronique grand public soit présente (typiquement, en France, Thalès ou encore Airbus et autres constructeurs aéronautiques), voire également avec le développement automobile pour les drones terrestres (cf. développement accéléré des véhicules autonomes). En corollaire, la disparition d'une industrie nationale civile dans ces domaines essentiels, conduira nécessairement à l'arrêt du développement des nanotechnologies dans ces secteurs. Ceci indique que ces différentes hypothèses sont fortement tributaires d'un contexte extérieur au champ considéré, typique de secteurs applicatifs duaux.

La diffusion des informations et des connaissances

Nathalie Dedessus-Le Moustier, université de Bretagne-Sud, et Michaël Koller, Suva

Les connaissances sur les nanomatériaux¹ et sur leurs effets potentiels sur la santé apparaissent peu partagées, alors même qu'ils sont très largement fabriqués, manipulés et commercialisés. L'amélioration de l'information sur les nanomatériaux pourrait-elle permettre une meilleure acceptation de ceux-ci ?

Définition

L'analyse de la diffusion des connaissances et des informations sur les nanomatériaux doit porter, d'une part, sur les sources d'information ou les canaux de diffusion, et, d'autre part, sur ses destinataires. Les principales sources d'information sont l'État, notamment par le biais de ses agences, et les entreprises et leurs représentants (branches professionnelles...). Parmi les destinataires, on peut distinguer la population générale composée de citoyens et/ou consommateurs et les salariés des entreprises qui fabriquent ou utilisent des nanomatériaux. La présente fiche est basée sur cette distinction.

Par ailleurs, une distinction doit être faite entre l'information et la connaissance. L'information est une source de la connaissance. La connaissance met en œuvre un processus humain de transformation des informations brutes afin de leur donner un sens, elle nécessite une appropriation et une interprétation.

¹ 54 % des européens n'ont même jamais entendu parler des nanotechnologies et 75 % des travailleurs et des employeurs du secteur de la construction ne savent pas qu'ils utilisent de tels matériaux (Eurobarometer, 2010).

Rétrospective

Diffusion des connaissances et des informations sur les nanomatériaux à destination de la population générale

On entend généralement par là la diffusion d'informations émanant de l'État ou de l'industrie à destination des citoyens et des consommateurs. Cependant, de nombreux organismes fournissent des informations sur les nanomatériaux et prennent position, comme des associations de consommateurs, des associations de défense de l'environnement, des agences comme l'Anses, l'INRS, l'Appa, l'Afnor et des centres de recherche publique : l'Inserm, le CNRS, le CEA, l'Ineris... On peut également citer C'Nano qui regroupe des centres de recherche travaillant sur les nanosciences et qui a notamment pour objectif de favoriser une communication scientifique sur le sujet.

C'est Internet qui constitue aujourd'hui la source d'information la plus importante et la plus riche. Une série d'entreprises, d'instituts de recherche et d'organismes publics ou privés travaillant dans le domaine des nanotechnologies mettent sur Internet des informations ayant trait à ces technologies. Il n'est pas toujours facile d'évaluer les contenus Internet, la prudence est donc de mise. On ne tentera pas ici de faire un inventaire des pages Internet, la volatilité étant particulièrement grande dans ce domaine.

Les autres vecteurs de l'information sont notamment les supports imprimés (journaux, livres, autres publications), la télévision, la radio, les *podcasts*, les fiches de données de sécurité, les communications orales, les réunions débats...

D'autres possibilités pour les citoyens français de faire connaître leur opinion et de recueillir des informations sur un sujet sont les conférences de citoyens/conférences de consensus. Ainsi, des conférences de citoyens se sont tenues, en 2006 et 2007, sur les nanotechnologies. Elles étaient organisées par l'Appa/Epe (Association pour la prévention de la pollution atmosphérique / Entreprises pour l'environnement) et le Conseil régional d'Île-de-France. L'Anses² a créé en 2011 un Comité de dialogue sur les nanomatériaux. La CNDP (Commission nationale du débat public), qui organise depuis une vingtaine d'années des débats sur la protection de l'environnement auxquels est associée la population, a lancé en 2009 une série de débats publics sur les options générales en matière de développement et de régulation des nanotechnologies. Dix-sept débats publics ont ainsi été organisés dans différentes villes afin de recueillir le point de vue du grand public. Il convient enfin de mentionner le Nanoforum qui a eu comme objectif de favoriser échanges et débats sur les aspects sanitaires, environnementaux et sociaux du développement des nanotechnologies et des nanomatériaux par l'organisation de rencontres entre les scientifiques, les industriels, les milieux associatifs et professionnels, les journalistes...

Un document technique international ISO/TS 13830 est destiné à tous les fabricants qui souhaiteraient, de façon volontaire, indiquer la présence de nano-objets dans leurs produits de consommation.

En ce qui concerne les obligations légales d'information, on se référera avant tout au règlement REACh. D'une façon générale, toutes les substances chimiques commercialisées dans l'Union européenne, quelle que soit la quantité mise sur marché, doivent comporter

² Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

des informations sur les risques potentiels pour la santé et l'environnement, qu'il s'agisse ou non de nanomatériaux. En ce qui concerne plus spécifiquement les nanomatériaux, depuis le 1^{er} janvier 2013, toutes les substances nanoparticulaires fabriquées, importées ou mises sur le marché en France sont soumises à obligation de déclaration (lois Grenelle 1 et 2). Cependant, ces déclarations sont surtout destinées à informer l'État, plus que le public. Il existe néanmoins des obligations spécifiques d'information des consommateurs : ainsi, le terme nano doit figurer dans la liste des ingrédients des denrées alimentaires contenant des nanomatériaux manufacturés (règlement 1169/2011/UE). De même, les étiquettes des cosmétiques doivent signaler la présence éventuelle de nanomatériaux (règlement 1223/2009/CE).

S'agissant des pouvoirs publics, le principe de précaution sous-tend un principe essentiel de recherche d'information, itérative, qui suppose de suivre l'évolution des connaissances sur les risques et d'évaluer les actions menées pour connaître ces risques. Il pèse donc sur l'État une obligation active d'information sur les risques susceptibles d'être encourus.

L'existence de multiples sources d'information ne conduit, toutefois, pas à une meilleure acceptation des nanotechnologies, comme l'a montré une étude menée en 2011 par l'Inra. Selon un sondage Eurobaromètre, la confiance accordée à une information dépendrait plutôt de la source de cette information : c'est aux médecins et aux experts du secteur santé que l'on fait le plus confiance, suivis par les organisations de consommateurs, les scientifiques et les groupes de défense de l'environnement. C'est vis-à-vis de l'industrie agroalimentaire et des détaillants que la confiance est la plus faible.

Diffusion des connaissances et des informations sur les nanomatériaux à destination des salariés

L'information au sein de l'entreprise est un droit essentiel des salariés. La Charte communautaire du 9 décembre 1989 considère même l'information, la consultation et la participation des travailleurs comme un droit fondamental, au même titre que l'égalité de traitement ou la protection de la santé et de la sécurité dans le milieu de travail. Pour autant, le partage de l'information ne se réalise pas sans se heurter à certaines difficultés. L'information se situant au cœur des relations de pouvoir dans l'entreprise est aussi un facteur de revendication voire d'émancipation des salariés. Les entreprises évoquent, quant à elles, l'idée que la transmission de l'information ne doit pas nuire à leurs intérêts et opposent des exigences de secret et de discrétion à certaines demandes d'information.

La directive n° 391/CEE du 12 juin 1989 comporte plusieurs dispositions portant sur l'information des travailleurs. Dans la liste des préalables, il est affirmé que « pour assurer un meilleur niveau de protection, il est nécessaire que les travailleurs et/ou leurs représentants soient informés des risques pour leur sécurité et leur santé et des mesures requises pour réduire ou supprimer ces risques ». L'article 10 de la directive prévoit que « l'employeur prend les mesures appropriées pour que les travailleurs et/ou leurs représentants [...] reçoivent [...] toutes les informations nécessaires ». Les directives particulières concernant des risques spécifiques affirment les mêmes exigences d'information à la fois individuelle et collective des travailleurs.

En droit interne, organiser cette information constitue pour l'employeur une des façons de satisfaire son obligation de prévention. Le Code du travail lui impose d'organiser et de dispenser une information des salariés sur les risques pour la santé et la sécurité et les mesures prises pour y remédier. Cette information a été

améliorée par le décret du 17 décembre 2008 qui prévoit que l'information doit être donnée aux travailleurs d'une manière compréhensible pour chacun, lors de l'embauche et chaque fois que nécessaire. En outre, le document unique d'évaluation des risques doit être tenu à la disposition de tous les salariés. Cette obligation générale d'information est complétée par une information spécifique sur certains types de risques, notamment en ce qui concerne les agents chimiques dangereux (Code du travail, article R. 4412-38).

Les entreprises disposent classiquement de plusieurs moyens d'information sur les risques pour leur personnel : fiches de données de sécurité, affichage, formation... Aujourd'hui les fiches de données de sécurité sont le principal moyen d'information mais leur contenu n'est pas toujours satisfaisant. Une étude de 30 fiches de données de sécurité de nanomatériaux disponibles sur le marché, basée sur les instructions des directives européennes, a montré que la qualité d'information était très variable³. Les fiches de données de sécurité restent ainsi sibyllines sur les risques, en plus d'être plus ou moins bien adaptées en matière de communication. Dans un contexte de déficit d'information sur les risques liés aux nanomatériaux, la connaissance des salariés semble elle aussi extrêmement réduite. Parmi les travailleurs, les experts, chercheurs et scientifiques, apparaissent comme étant les plus sensibles aux risques, deux fois plus que les autres populations salariées⁴. Les risques professionnels les mieux perçus concernent l'inhalation des nanoparticules et l'exposition cutanée. Mais cette information est peu partagée au sein des divers groupes professionnels. L'information sur les risques constitue donc un sujet crucial pour le développement des activités de manipulation des nanomatériaux.

Dans l'entreprise, le médecin du travail et le CHSCT contribuent à l'information des travailleurs. S'agissant de cette institution représentative du personnel, il faut souligner qu'elle dispose d'un droit étendu à l'information. Le Code du travail prévoit de nombreuses obligations d'information à la charge de l'employeur propres à certains risques, mais l'obligation générale d'information est plus large ; elle s'étend à toutes les questions liées à la santé et à la sécurité au travail. La confidentialité, par exemple sur un procédé de fabrication, ne peut pas avoir pour conséquence de restreindre l'information du comité, ses membres étant tenus à une obligation de discrétion et de secret.

Aux difficultés liées à l'accès à l'information peuvent s'ajouter des problématiques de maîtrise ou de compréhension de l'information sur des sujets parfois complexes comme les nanomatériaux. S'agissant du CHSCT, la connaissance du risque peut s'accompagner d'une aide à sa compréhension, le recours à un expert. Deux hypothèses permettent ce recours : le risque grave constaté dans l'établissement et le projet important modifiant les conditions d'hygiène et de sécurité ou les conditions de travail (Code du travail, article L. 4614-12). Cependant, aucun cabinet d'expertise, qui aide à la représentation syndicale et à la formulation d'un avis par le CHSCT, n'est pour l'heure formé ou équipé sur le sujet des nanomatériaux.

Le fait que la charge de l'information incombe à l'employeur, avec les divergences et les arbitrages inhérents à ses moyens de veille scientifique et documentaire, place les salariés dans une situation d'asymétrie d'information. De fait, certains salariés

³ Scheider T et ali, 2007 , Evaluation and control of occupational health risks from nanoparticles, <http://www.norden.org/da/publikationer/publikationer/2007-581>

⁴ Cheng et ali, The Risk Perception of Nanotechnology in Taiwanese General Population, Workers, and Experts, *Epidemiology*: November 2009 - Volume 20 - Issue 6 – p.227

s'interrogent sur les risques lors de l'apparition d'un pictogramme nouveau ou de l'intitulé nano apparaissant dans une composition. Le problème n'est pas la dépendance, mais, surtout, ce que les économistes appellent le risque moral généré par cette situation d'incertitude. Dans le contexte actuel, profitant des technologies de l'information telles qu'Internet, nombreux sont ceux qui recherchent alors par eux-mêmes l'information, quitte à ce qu'elle diffère de celle transmise par l'employeur.

Prospective

Au regard du potentiel de développement des nanomatériaux, la question de la diffusion des informations qui y sont relatives reste pertinente, pour les années à venir.

Quels sont les déterminants de l'évolution de la variable ?

- Émetteurs : nombre d'informateurs, crédibilité, mode de communication de l'information, volume d'informations, complexité de l'information.
- Destinataires : intérêt, niveau de formation, âge, catégorie socioprofessionnelle.
- Développement des nanotechnologies : bénéfiques, risques, dangers.

Les tendances du passé peuvent-elles se poursuivre ?

Jamais l'accès à l'information n'a été aussi rapide et aussi facile sur un aussi grand nombre de sujets. Là où, sur des questions complexes, il fallait autrefois des heures de recherche, on trouve aujourd'hui des réponses en quelques clics sur Internet. À cela s'ajoute le flux d'informations qui nous parviennent de toutes parts et que nous recevons de façon passive, que nous le voulions ou non. Il n'est pas facile, compte tenu des volumes d'informations et du nombre de médias existants, de séparer le bon grain de l'ivraie, de garder le recul nécessaire et d'enregistrer tout cela de façon durable dans notre mémoire. Pour le profane, il est souvent impossible de distinguer les informations dûment validées de celles qui le sont moins. On n'accorde pas toujours le temps nécessaire à une donnée nouvelle, par manque de temps, mais aussi du fait des multiples facteurs qui distraient et détournent notre attention. Les présentations tendancieuses marquent forcément plus les esprits et les nouvelles à sensation retiennent plus l'attention que les informations peu spectaculaires. C'est un phénomène profondément humain et que l'on peut observer non seulement chez les profanes, mais aussi chez les spécialistes et les chercheurs, car on tend malheureusement à ne publier que les résultats de recherche positifs, et à passer sous silence les résultats négatifs. Tous ces phénomènes se traduisent par des biais d'information et les émetteurs doivent en tenir compte.

Pour toucher les citoyens, dans la jungle des données, il faut des informations neutres, objectives, émanant d'une institution digne de confiance, sous forme de messages brefs, attrayants et simples. Les principales institutions compétentes dans ce domaine devraient mutualiser leurs ressources et créer une plateforme commune. De la même façon, les principales industries utilisant les nanotechnologies devraient mutualiser leurs ressources

et développer des plateformes communes, harmoniser leurs étiquetages, etc. Une démarche commune des émetteurs simplifie l'information des citoyens.

S'agissant des travailleurs, en dépit des évolutions récentes, leur accès à l'information pourrait encore être enrichi. La loi du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement prévoyait l'amélioration de l'information due par les employeurs à leurs salariés sur les risques émergents, notamment en matière de nanoparticules et d'ondes électromagnétiques (article 42). Cette disposition ne s'était pas encore traduite par des mesures obligatoires. La loi du 16 avril 2013 relative à l'indépendance de l'expertise en matière de santé et d'environnement et à la protection des lanceurs d'alerte améliore l'accès à la connaissance des travailleurs par une information sur les risques que les produits ou procédés de fabrication peuvent faire peser sur l'environnement ou sur la santé publique, et sur les mesures prises pour y remédier. Dans le même sens, l'obligation pour les sociétés cotées de communiquer des informations environnementales et sociales intégrées au rapport annuel de gestion a été élargie à certaines sociétés non cotées, et précisée sur le contenu de l'information à fournir, notamment par la loi du 12 juillet 2010, dite Grenelle 2. Parmi les informations à fournir figurent celles portant sur l'organisation du travail, les relations sociales et la santé et la sécurité (décret n° 2012-557 du 24 avril 2012).

Considérant que les directives et réglementations existantes ne sont pas appropriées à la régulation des nanomatériaux, les syndicats de salariés européens, comme la Confédération européenne des syndicats, et nationaux se tournent vers les pouvoirs publics et tentent d'exiger des modifications du cadre juridique actuel, notamment par une amélioration de l'information des travailleurs. La CFDT vient d'éditer un guide intitulé Nanotechnologies. L'exigence d'un développement responsable, afin d'aider les militants et les salariés concernés à se prononcer en connaissance de cause sur les choix qui seront faits quant au développement des nanotechnologies.

Au Brésil, la convention de l'industrie chimique concernant les nanotechnologies et nanomatériaux comporte une obligation d'information des travailleurs. Ce pays a par ailleurs organisé, les 5 et 6 septembre 2013, l'International Workshop on Nanotechnology and Society in Latin America. Nanotechnology, Labor and Regulation, qui a mis en place une déclaration basée sur la transparence et la prévention des nanotechnologies⁵. Les signataires volontaires (entreprises, gouvernement, institutions, syndicats...) s'engagent à favoriser l'information et les démarches de précaution concernant les nanotechnologies.

Existe-t-il des facteurs de ruptures des tendances du passé ?

Les entreprises évoquant l'idée que la transmission de l'information ne doit pas nuire à leurs intérêts et opposant des exigences de secret et de discrétion aux demandes d'information font pression sur les pouvoirs publics qui restreignent le droit à l'information sur les nanomatériaux.

⁵ Le formulaire de la déclaration est accessible sur le site de l'association CIEL : http://action.ciel.org/p/salsa/web/questionnaire/public/?questionnaire_KEY=1495&key=677816

Hypothèses

Hypothèse 1. Renforcement important de l'information et de la communication auprès du grand public et dans le monde du travail

Hypothèse qui repose sur une demande forte d'une meilleure diffusion de l'information par des groupes de pression comme les associations de consommateurs, les organisations non gouvernementales... mais également des syndicats de salariés, comme actuellement au Brésil, dans un contexte où des recherches mettent en évidence la toxicité de certains nanomatériaux.

Hypothèse 2. Renforcement de l'information et de la communication dans le monde du travail

Cette hypothèse reprend le découpage retenu dans cette fiche entre les catégories de destinataires de l'information sur les nanomatériaux. On peut, par exemple, envisager que les règles du droit du travail, protectrices des intérêts des salariés, renforcent le droit à l'information de ceux qui fabriquent et manipulent des nanomatériaux alors que la diffusion des connaissances auprès du grand public n'est pas améliorée, en raison des enjeux économiques attachés à leur développement.

Hypothèse 3. Information sans communication

Ici, il s'agit seulement d'une information donnée par les entreprises à destination des salariés et du public, sans que soit recherchée une véritable diffusion des connaissances et organisée un échange. Dans ce cas, il se peut que le public n'accepte pas le développement des nanomatériaux et reste sceptique voire hostile, parce que la démarche n'est pas participative et ne permet aucun débat.

Hypothèse 4. Passivité vis-à-vis des nanomatériaux (désintérêt du public et démotivation des experts, journalistes...)

Cette attitude n'empêche pas la communication sur des nanomatériaux précis comme le graphène.

Références

CFDT, Nanotechnologies. L'exigence d'un développement responsable, Collection compétences syndicales, 1ère édition, novembre 2013.

Dedessus-Le Moustier, Drais E., L'information économique et sociale des salariés et des représentants du personnel en matière de santé au travail : bilan et perspectives face aux risques émergents, Revue Économies et Sociétés, 8/2013, pp.1345-1370.

Provost L., Étude de l'acceptabilité sociale des nanotechnologies appliquées au domaine de l'emballage, sous la direction de Dedessus-Le Moustier N. et Juet E. Synthèse Projet transversal ECO-I-PACK. Université de Bretagne-Sud, 2011.

Les parties prenantes

Myriam Ricaud, INRS

Les nanomatériaux manufacturés représentent aujourd'hui un enjeu économique, technologique et sociétal majeur. Ils ont un impact croissant dans des secteurs aussi stratégiques que la santé, l'énergie, l'environnement, les transports et permettent à des industries plus traditionnelles (textile, agroalimentaire, chimie) d'accroître leurs débouchés par une technicité grandissante de leurs produits. Mais les nanomatériaux manufacturés suscitent également de nombreuses interrogations notamment en termes de dangers pour la santé et l'environnement ainsi que des questions éthiques et sociétales.

Il existe ainsi de nombreux groupes, plus ou moins bien organisés, qui exercent sur des personnes ou des institutions détentrices de pouvoir en France mais également en Europe une pression (ou une influence) afin de défendre leurs intérêts particuliers associés aux nanomatériaux manufacturés, qu'ils soient économiques, financiers, moraux, etc. Ces groupes cherchent par exemple à promouvoir une évolution de la législation, à encourager des changements politiques ou économiques, etc.

Leurs modes d'action peuvent être discrets (participation à des instances consultatives, activation de réseaux, etc.) ou publics (déclaration, pétition, manifestation, etc.).

Rétrospective et situation actuelle

Le terme *lobbying* a acquis ses lettres de noblesse en Grande-Bretagne. Il désigne les corridors ou couloirs de la Chambre des communes britannique. C'est aux environs de 1830, que le terme de *lobby* désigne le groupe de pression. Le développement du *lobbying* est à relier avec la diversification et la spécialisation des secteurs industriels et commerciaux. Les *lobbies* sont présents à tous les niveaux : la complexité des affaires publiques, le besoin d'informations fiables en amont de toute décision politique, la préparation du marché européen sont autant de facteurs qui ont imposé les groupes de pression comme des interlocuteurs devenus « indispensables » auprès des politiques.

Typologie des groupes de pression

Les groupes de pression ou d'influence associés au développement des nanomatériaux manufacturés actifs en France sont nombreux et variés :

- organisations professionnelles : Union des industries chimiques (UIC) (et son homologue européen, European chemical industry council, Cefic), Fédération des industries des peintures, encres, couleurs, colles et adhésifs (Fipéc), Fédération des entreprises de la beauté (Febea), Association nationale des industries alimentaires (Ania), Les entreprises du médicament (Leem), Fédération française du bâtiment (FFB), Nanotechnology industries association (NIA), etc. ;
- organisations non gouvernementales (ONG) : France nature environnement, Les amis de la terre, Familles rurales, Consommation, logement et cadre de vie (CLCV), Union fédérale des consommateurs (UFC), 60 millions de consommateurs, etc. ;
- syndicats patronaux et salariés : Medef, CGPME, UPA, CGT, CFDT, FO, CFE-CGC, CFTC, Confédération européenne des syndicats (CES), etc. ;
- associations citoyennes : Association de veille et d'information civique sur les enjeux des nanosciences et des nanotechnologies (Avicenn), Pièces et main d'œuvre (PMO), Association sciences et démocratie, Fondation sciences citoyennes, Collectif citoyen nanotechnologies du plateau de Saclay, etc. ;
- cabinets spécialisés mandatés par des entreprises industrielles ou des groupes financiers, etc. ;
- cabinets de conseil : Lux Research, Boston Consulting Group, etc. ;
- chambres de commerce et d'industrie ;
- think tanks (laboratoires d'idées) ;
- etc.

La plupart de ces entités exercent leur influence sur les décideurs politiques et économiques depuis un peu plus d'une quinzaine d'années.

Certains groupes, et notamment certaines associations citoyennes et ONG, se consacrent exclusivement aux questions relatives aux nanomatériaux manufacturés telles que l'Association de veille et d'information civique sur les enjeux des nanosciences et des nanotechnologies (Avicenn) ou le Collectif citoyen nanotechnologies du plateau de Saclay. Ces structures, bien souvent de taille modeste, sont actives uniquement sur le territoire français. D'autres associations et ONG de taille plus conséquente exercent leur influence au niveau international, parmi celles-ci Les Amis de la Terre qui sont représentés dans 72 pays avec plus d'un million et demi de membres.

Les syndicats salariés français se mobilisent clairement sur le sujet du développement des nanomatériaux manufacturés depuis approximativement cinq ans. En effet, la tenue du débat public national sur les nanotechnologies qui a débuté en octobre 2009 a contraint les syndicats salariés français à structurer une position sur un sujet qu'ils jugeaient jusque là techniquement compliqué et peu tangible en termes d'activité industrielle¹. La Confédération européenne des syndicats a, quant à elle, émis une première résolution sur le sujet en juin 2008.

¹ Syndicalisme et nanotechnologies. De l'espace des relations professionnelles à l'espace public des risques, Patrick Chaskiel, Sociologie du Travail, Volume 55, Issue 4, octobre - décembre 2013, pp. 454-474.

Ces groupes ont des avis et intérêts bien souvent divergents. Globalement, les organisations non gouvernementales, les associations citoyennes et les syndicats salariés sont plutôt en faveur d'un développement encadré et précautionneux des nanomatériaux manufacturés, voire éventuellement pour certains en défaveur (la branche chimie du syndicat salarié CGT, l'association citoyenne Pièces et main d'œuvre et l'ONG Les Amis de la Terre ont ainsi demandé un moratoire total ou partiel), alors que les organisations professionnelles et les syndicats patronaux soutiennent, quant à eux, un développement massif des nanomatériaux.

Modes d'action des groupes de pression

Les groupes d'intérêt procèdent à des interventions destinées à influencer directement ou indirectement l'élaboration, l'application ou l'interprétation de mesures législatives existantes, de normes, de règlements et plus généralement, toute intervention ou décision des pouvoirs publics relatives au développement des nanomatériaux manufacturés.

Ainsi, ces entités participent voire même organisent des débats, des conférences, des plateformes de dialogue, etc. portant sur les enjeux associés au développement des nanomatériaux manufacturés aux niveaux local, national et international. Parmi ces initiatives, les cycles d'échanges proposés depuis 2006 par l'association VivAgora² ou encore les débats organisés régulièrement depuis 2010 par le Collectif citoyen nanotechnologies du plateau de Saclay³. Il convient également de citer le Nanoforum⁴, huit séances de dialogue organisées par le Conservatoire national des arts et métiers (Cnam) qui se sont tenues à Paris entre juin 2007 et avril 2009. A la suite de ce forum, un débat public national a été annoncé par une lettre conjointe de huit ministères en date du 23 février 2009. La Commission nationale du débat public (CNDP) a ainsi organisé 17 réunions publiques dans 17 villes de France sur des thèmes précis jusqu'en février 2010. Les objectifs de cette concertation étaient d'informer la population sur les principales controverses que soulève le sujet et lui permettre de comprendre les positions des acteurs qui les portent ainsi que d'éclairer les grandes orientations de l'action de l'État. Des syndicats, des ONG, des organisations professionnelles (FO, Fondation sciences citoyennes, Medef, Les Amis de la Terre, Febea, etc.) se sont exprimés au cours de ces débats, qui se sont bien souvent déroulés dans un contexte tendu ; et ont également été invités à rédiger un « cahier d'acteur », document de synthèse présentant leur point de vue argumenté sur le sujet des nanotechnologies et nanomatériaux. Le Gouvernement a pris différents engagements⁵ suite au bilan transmis par le CNDP. Les groupes de pression sont également actifs dans diverses instances en France comme par exemple le comité de dialogue Nanomatériaux et santé mis en place par l'Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) en 2009 et qui a été conçu comme un espace d'échanges et de questionnements visant à nourrir les travaux scientifiques conduits ou encouragés par l'agence.

Les groupes d'influence sont également présents dans des structures à visées plus techniques et économiques tels que les comités de normalisation français, européens et internationaux. Parmi ces comités, la commission de normalisation X 457 de l'Afnor, le

² L'association VivAgora n'existe plus depuis fin 2013.

³ <http://www.collectif-nanosaclay.fr>

⁴ <http://securite-sanitaire.cnam.fr/nanoforum>

⁵ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Les_engagements_du_Gouvernement_sur_les_suites_a_apporter_au_debat_public_relatif_au_developpement_et_a_la_regulation_des_nanotechnologies.pdf

comité technique 452 du CEN⁶ ou encore le comité technique 229 de l'ISO⁷ sont spécifiquement dédiés aux nanomatériaux manufacturés. Créée dès 2005, la commission française Afnor X 457⁸ est sous la présidence depuis plusieurs années d'un représentant de l'Union des industries chimiques (UIC). Y sont représentés des ONG (CLCV, 60 millions de consommateurs, etc.), des organisations professionnelles (Fipéc, Febea, etc.), de grands groupes industriels (L'Oréal, Michelin, Solvay, Suez Environnement, etc.), des ministères (ministère de l'Économie et des Finances, ministère de la Défense, ministère des Affaires sociales et de la Santé, etc.), etc. L'objectif de cette commission est de « favoriser le développement des nanotechnologies afin de pouvoir bénéficier de leurs avancées tout en se prémunissant de leurs potentiels effets négatifs ». Le comité technique 229 de l'ISO est, quant à lui, actuellement présidé par un industriel britannique de la pharmacie.

Les groupes d'influence sont également très représentés au niveau de la Commission européenne et du Parlement européen qui a vu, ces dernières années, ses pouvoirs augmentés. Ils interviennent fréquemment dans le processus décisionnel à Bruxelles, afin de concrétiser leurs demandes et de valider leurs intérêts. Ils se sont donnés pour tâche d'influencer, d'orienter, voire de s'opposer aux décisions communautaires prises sur les nanomatériaux manufacturés.

Ainsi, la version actuelle de REACH⁹, qui est le règlement européen sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques, en vigueur depuis 2007 en Europe, ne prévoit pas de dispositions spécifiques aux nanomatériaux ; par défaut, les nanomatériaux sont considérés comme étant couverts par ce règlement au même titre que les autres substances chimiques. La Commission européenne a annoncé en 2012 qu'une modification des annexes de REACH allait être effectuée afin de mieux prendre en compte certaines particularités des nanomatériaux. Pour cela, la Commission européenne a lancé une consultation publique en anglais ouverte à tous jusqu'à mi-septembre 2013. Composée de 41 pages et 38 questions, cette consultation proposait, en sus de l'option qui représente la situation actuelle, cinq options visant à clarifier la procédure d'enregistrement des nanomatériaux dans les dossiers d'enregistrement. Des organisations professionnelles, des ONG, des associations citoyennes ont répondu à cette consultation, certaines ayant même rendu public leurs réponses via leur site internet ou par communiqué de presse. Parmi les différentes options proposées, l'option la plus souple a été privilégiée par les fédérations d'industries et l'option la plus exigeante en termes d'information et de garanties sur la sécurité des nanomatériaux a été retenue par les autorités françaises ainsi que plusieurs ONG. Le rapport final de cette consultation doit être formalisé dans les prochains mois par la Commission.

Autre consultation, à l'automne 2010, la Commission européenne a soumis un projet de recommandation de définition du terme nanomatériau. 200 réponses à cette consultation auraient été adressées à la Commission par des fédérations professionnelles, des associations citoyennes, des syndicats, des ONG, etc. À la fin mars 2011, la Commission européenne a officialisé le fait qu'elle ne formulerait pas de définition aboutie avant plusieurs mois, suscitant l'insatisfaction générale. Ce retard dans l'adoption du projet de recommandation résulte de divergences d'opinion entre les différentes parties prenantes, entre lesquelles la Commission ne parvenait pas à arbitrer. En effet, plusieurs directions de

⁶ European committee for standardization.

⁷ International Organization for standardization.

⁸ http://www2.afnor.org/espace_normalisation/structure.aspx?commid=59942

⁹ Registration, Evaluation, Authorization and restriction of CHemicals.

la Commission européenne ont été impliquées dans cette démarche, chacune soumise à un *lobbying* intense en provenance d'acteurs aux intérêts contraires. La recommandation de la Commission européenne est finalement publiée le 18 octobre 2011¹⁰. Elle suscite dès sa parution de vives réactions à la fois des organisations professionnelles et des acteurs de la société civile.

Par ailleurs, au niveau de l'Union européenne, des dispositions spécifiquement dédiées aux nanomatériaux ont été intégrées, depuis 2009, dans plusieurs législations sectorielles. Ainsi, la Commission européenne a proposé, en décembre 2013, un projet de règlement délégué relatif à l'étiquetage des produits alimentaires qui deviendra obligatoire en décembre 2014 comme le prévoit le règlement (UE) n° 1169/2011¹¹. Ce règlement délégué vise à préciser les conditions d'information des consommateurs sur la présence de nanomatériaux manufacturés dans les denrées alimentaires. Mais alors que le règlement initial prévoyait que « tous les ingrédients qui se présentent sous forme de nanomatériaux manufacturés soient indiqués clairement dans la liste des ingrédients », le projet de règlement délégué marque un recul. La Commission européenne prévoit en effet que, pour les ingrédients déjà utilisés sous forme nanométrique depuis des décennies dans l'alimentation, la mention [nano] ne soit pas obligatoire. Or, ce sont surtout les additifs alimentaires qui sont présents depuis longtemps sous forme nanométrique dans l'alimentation - notamment le carbonate de calcium, le dioxyde de titane et la silice - qui suscitent des inquiétudes au vu des incertitudes concernant leur innocuité. Les représentants des industriels comme la ELC (Federation of european specialty food ingredients industries) ont fortement soutenu la position de la Commission européenne, ce qui n'est bien entendu pas le cas des associations de consommateurs, ni de l'État français qui ont finalement été entendus. Début mars, le Parlement européen à rejeter le projet de Règlement, la Commission doit donc présenter une nouvelle proposition.

En France, dans le cadre du dispositif de déclaration annuelle des « substances à l'état nanoparticulaire » entré en vigueur au 1^{er} janvier 2013 (articles L. 523-1 à L. 523-3 du code de l'environnement), le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie a constitué un groupe de travail composé d'organisations professionnelles (UIC, Fipecc, Ania, etc.) et d'ONG (VivAgora, Avicenn). Le groupe est amené à se réunir une fois par an dans l'objectif de dresser un bilan de ce dispositif réglementaire. Ces entités ont également été consultées lors de l'élaboration même des textes fondateurs de cette obligation de déclaration.

Les groupes de pression publient également une multitude de documents (communiqués et articles de presse, sites internet, rapports de synthèse, ouvrages, etc.) proposant un argumentaire bien travaillé dans l'objectif de se faire connaître, de promouvoir leurs avis et intérêts, d'interpeller les décideurs politiques et économiques, de proposer des actions et de mobiliser des éventuels sympathisants. Ainsi, en novembre 2012, trois ONG, le Center for international environmental law (CIEL), ClientEarth et Les Amis de la Terre Allemagne (BUND) ont publié un rapport intitulé *High time to act on nanomaterials - Proposal for a 'nano patch' for EU Regulation*¹² dans lequel elles défendent la mise en place d'une réglementation spécifique aux nanomatériaux. En 2013,

¹⁰ Recommandation n° 2011/696/UE publiée le 20 octobre 2011 au Journal Officiel, L 275/38.

¹¹ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:304:0018:0063:FR:PDF>

¹² http://www.ciel.org/Publications/Nanopatch_EU_Nov2012.pdf

l'Institut syndical européen (Etui) a publié un ouvrage intitulé *Les nanomatériaux sur le lieu de travail. Quels enjeux pour la santé des travailleurs ?*, l'organisation professionnelle UIC propose, quant à elle, une page internet¹³ *Nanomatériaux : le monde de l'infiniment petit pour de grands défis*, etc.

Prospective

Les groupes de pression ont acquis un poids incontestable au cours des dernières décennies et leurs actions se déroulent au devant des scènes nationales et internationales.

Compte tenu des enjeux économiques, technologiques et politiques associés au développement des nanomatériaux manufacturés, les groupes de pression représentant les intérêts des grandes entreprises industrielles et financières ne peuvent *a priori* que développer leurs stratégies d'influence auprès des personnes et institutions détentrices de pouvoir en France et en Europe sur cette question.

De même, les multiples questions sociétales et éthiques que suscite le développement des nanomatériaux manufacturés ne peuvent que renforcer la place des groupes d'influence représentant la société civile. Sans oublier, les syndicats salariés qui font entendre leurs voix afin « d'éviter les erreurs du passé, autrement dit celles relatives notamment à l'amiante ».

Le poids de ces groupes de pression aux intérêts divergents, sur les décideurs politiques et économiques français et européens, est difficile à estimer et à extrapoler. Il semblerait que l'État français tout comme la Commission européenne veuillent globalement ménager l'ensemble des parties prenantes en organisant par exemple des consultations ou des débats publics. Néanmoins, il convient de noter que, selon la Commission, parmi les 15 000 à 20 000 groupes d'influence actifs à Bruxelles environ 1/3 sont des associations qui défendent les « intérêts citoyens » et un peu plus de la moitié protègent des intérêts économiques. De même, en France, les associations citoyennes et les ONG sont nombreuses à être actives sur le sujet du développement des nanomatériaux manufacturés mais elles disposent parfois de moyens humains et financiers limités, contrairement aux organisations professionnelles, aux grands groupes industriels et financiers et aux syndicats patronaux qui peuvent être mieux structurés et donc exercer une influence plus significative.

Par ailleurs, depuis quelques années, il semblerait que le Parlement européen ait engagé une réflexion visant à réglementer le *lobbying* au sein de l'enceinte parlementaire. Les premières tentatives de réglementation remontent même aux années 1990. Inspiré par la législation aux États-Unis, le Parlement européen adopte en juillet 1996 le rapport Ford, qui établit un registre pour les *lobbyistes* qui souhaitent accéder au bâtiment parlementaire et qui propose un code de bonne conduite. En même temps, le rapport

¹³ <http://www.uic.fr/Activites/Innovation/Nanomateriaux>

Nordmann demande à ce que les parlementaires donnent des informations sur leurs affiliations professionnelles et leurs sources de revenus. Pour les critiques de la culture de *lobbying* à Bruxelles, ces promesses ne sont guère suffisantes. Depuis dix ans, le Corporate Europe observatory et d'autres ONG s'opposent à l'influence des groupes économiques dans l'Union européenne et demandent en vain une réglementation plus stricte.

Hypothèses

Hypothèse 1. Influence égale des acteurs

Les différents groupes de pression, quels que soit les intérêts qu'ils défendent, maintiennent une influence égale sur les décideurs politiques et économiques. L'État français et la Commission européenne continuent à engager des actions de concertation et à solliciter et à ménager l'ensemble des parties prenantes.

Hypothèse 2. Influence dominante d'intérêts économiques

Les enjeux économiques et les débouchés (notamment en termes d'emplois) des nanomatériaux manufacturés sont considérables, les groupes de pression représentant les intérêts des entreprises industrielles et des groupes financiers sont très mobilisés et organisés, ils accroissent sensiblement leurs influences. Le poids politique des groupes défendant des intérêts économiques dépasse ainsi de loin celui des syndicats salariés, des organisations non gouvernementales et des associations citoyennes.

Hypothèse 3. Influence dominante de certains acteurs de la société civile

Les interrogations concernant notamment les dangers pour la santé et l'environnement des nanomatériaux manufacturés perdurent, la société civile est de plus en plus inquiète, les organisations non gouvernementales, les fédérations salariés et les associations citoyennes sont de plus en plus nombreuses, de plus en plus structurées et actives au niveau international, et donc de plus en plus entendues par les décideurs politiques. L'influence développée par les représentants des entreprises industrielles et des groupes financiers s'amointrit.

Éthique et valeurs sociales

Éric Drais, INRS

Définition

Cette variable porte sur divers points :

- l'acceptabilité des nanomatériaux et des technologies associées, du point de vue de la société, des entreprises et des prescripteurs (État, assureurs, organisations professionnelles, etc.) ;
- les interrogations et les craintes de la population générale sur le fait que les nanomatériaux seraient susceptibles de constituer une atteinte à différentes valeurs ou à différents principes considérés comme importants pour la vie de l'homme ou son existence en société, comme par exemple ceux du respect de l'autonomie, de la justice, de la liberté, de la dignité, du droit à la vie privée, etc. ;
- le rapport à la science et aux nouvelles technologies.

L'éthique comme cadre au projet métaphysique des nanotechnologies

Au sens strict, l'éthique décrit un ensemble de valeurs portées par un individu et par extension, un groupe. Ainsi définie, l'éthique est ancrée dans une culture donnée et elle est le produit d'un apprentissage. Étymologiquement, le terme d'éthique est formé à partir de la racine grecque *éthos*, signifiant « caractère », « disposition personnelle » et aussi « mœurs ». Cette même racine désignerait, d'après Vallet (1995) : « une habitude, un comportement passé dans l'usage et devenu référence » (*op. cit.* p.106)¹. Associée à l'idée « d'habitude, de coutume, d'usage » (les us et coutumes de la cité), comme de « manière

¹ Ce même auteur nous apprend en outre que *éthos* proviendrait de la racine indo-européenne *swedh*, exprimant « l'existence autonome soit d'un individu /.../ soit d'un groupe » (*op. cit.* p. 106).

d'être, disposition, caractère » (au sens aristotélicien du terme), l'éthique renvoie aux principes qui guident l'action.

L'importance de la notion d'éthique tient donc au sens de l'action qu'elle autorise. En effet, pour Fortin (1995), elle désigne un ensemble d'éléments communément admis dans un groupe social donné, qui définissent ce qui compte vraiment, ce qui fait sens : elle renvoie donc à une réflexion sur l'action et ses fondements, ses justifications. Dans une perspective de philosophie morale, elle peut s'entendre comme une tentative de réponse à la question fondamentale de Socrate : « comment doit-on vivre » (William, 1985).

À ce titre, des philosophes de l'antiquité gréco-romaine² jusqu'à nos jours, nombre de réflexions pour forger ou considérer les grands systèmes doctrinaux à visée universaliste ont traité d'éthique. Toutefois, si les débats consacrés aux questions d'éthique (et par extension aux notions de justice, de vertu, de bien, de morale, etc.), ont été longtemps dominés par des préoccupations idéalistes (au sens philosophique du terme), il semble qu'ils aient pris progressivement une tournure plus contextualisée chez les contributeurs modernes (des XX^e et XXI^e siècles). Autrement dit, les questions d'éthique tendent progressivement à sortir des débats abstraits, ceci au profit d'interrogations appliquées préférentiellement à des situations à la fois diversifiées et délimitées de nos environnements sociaux (la médecine, la politique, l'économie, l'entreprise, le travail). Et c'est bien entendu dans cette configuration plus finalisée et dans une certaine mesure plus pragmatique que nous nous intéressons ici à la question de l'éthique associée aux nanosciences et nanotechnologies.

La question de l'éthique est aujourd'hui convoquée à double titre par le développement des nanomatériaux : d'une part, parce que ce développement dépend de l'appropriation sociale des nanotechnologies dans le terreau culturel de nos sociétés et, d'autre part, parce qu'il est nécessaire de doter nos sociétés de principes directeurs (éthiques) pour fixer les limites socialement acceptables aux usages des nanotechnologies. C'est pourquoi l'éthique est mobilisée autant par les opposants aux nanotechnologies que par ses thuriféraires.

La question de l'éthique se pose avec acuité dans le cas des nanomatériaux. En effet, bien qu'assujettis à de nombreuses incertitudes, ces matériaux aux propriétés nouvelles se présentent comme susceptibles de résoudre la plupart des défis actuels de nos sociétés : climat, santé, vieillissement, pollutions, énergies, etc. Au point qu'en 2002, les promoteurs du programme américain sur les technologies convergentes promettent pas moins que « la paix mondiale, la prospérité universelle et la marche vers un degré supérieur de compassion et d'accomplissement ». Car la convergence entre nanotechnologies, biotechnologies, technologies de l'information et sciences cognitives (appelée convergence NBIC) ouvre bien une ère nouvelle qui constitue pour J-P. Dupuy depuis les années 2000, une source de questions éthiques originales (« Les nanotechnologies : éthique et prospective industrielle », 2004) pouvant même appeler un changement de paradigme

² On pense notamment au très célèbre *Éthique à Nicomaque* d'Aristote, mais il y aurait bien d'autres références classiques (non seulement antiques mais tout autant médiévales, renaissances, pré-modernes) à signaler (cf. la bibliographie historiographique et thématique très complète établie par Wunenberger, 1993) : Platon, Aristote, Sénèque, etc. pour la période antique ; les grands penseurs du christianisme médiéval (Plotin, Saint Augustin, Saint Thomas d'Aquin, etc.) ; les auteurs de la Renaissance (Érasme, La Boétie, Montaigne, etc.) ; puis ceux de l'âge classique (Bacon, Malebranche, Spinoza, etc.) ; ceux du siècle des lumières (Locke, Hume, Kant, etc.) ; les penseurs pré-modernes (Bentham, Mill, Fichte, etc.) ; enfin les modernes (Shopenhauer, Nietzsche, Bergson, etc.).

épistémologique et éthique (Kermisch et Pinsart, 2012) du fait de leur projet métaphysique de « reconceptualisation de la nature ». En effet, à l'échelle où se pratiquent les nanotechnologies, les frontières entre les disciplines deviennent floues. La manipulation de la matière à l'échelle de l'atome permet des liens entre biologie, physique, chimie, médecine, sciences de l'information... Elle donne le pouvoir de « connecter l'inerte et le vivant, le naturel et l'artificiel, le corps humain et les machines » (dossier CNRS).

En tant que technologies génériques associées à des enjeux considérables, les nanotechnologies soulèvent donc de multiples interrogations (site sante.gouv.fr : « Impact des nanomatériaux : une préoccupation des pouvoirs publics »). Au-delà de questions sanitaires et environnementales, l'intégration diffuse et invisible de nanomatériaux questionne par exemple les libertés individuelles du fait des possibilités de contrôle et de traçabilité ou encore la dignité humaine compte tenu de l'intervention sur le vivant et le potentiel de transformations humaines (post et transhumanisme). Alors que la réalité rejoint la fiction³, les perspectives aussi passionnantes qu'inquiétantes des nanotechnologies imposent la question de l'éthique.

Une difficile régulation éthique des nanotechnologies

Plusieurs pays investissant les nanotechnologies ont mis en place des programmes pour analyser les impacts ou aspects environnementaux, sociaux, juridiques des nanosciences et nanotechnologies. D'un point de vue éthique en amont ou en accompagnement du développement scientifique ou technique, il s'agit notamment d'informer et de permettre le dialogue avec le public, sans toutefois qu'il soit instrumentalisé ou simplement préparé à ce que certains voudraient lui imposer (Bensaude-Vincent). La difficulté à s'entendre sur une définition partagée des nanotechnologies complique néanmoins l'exercice, de même qu'il complique la délimitation des domaines d'application de régulation à ce propos.

En Europe, de nombreux débats ont eu lieu depuis les années 2000, associés à une évolution réglementaire et des recommandations déontologiques⁴ sur les nanosciences et nanotechnologies. La Grande-Bretagne, les Pays-Bas ou le Danemark ont été précurseurs. En France, la question de l'éthique a été soulevée en 2004 par J-P. Dupuy et F. Roure au titre de leur rapport de prospective « Les nanotechnologies : éthique et prospective industrielle » en appui de l'action publique. Puis en 2006, sort le rapport du Comité de la prévention et de la précaution (CPP), co-édité avec le ministère de l'Écologie et du

³ Combinant ces domaines, le scénario d'autoréplication incontrôlée de nanorobots, imaginé en 1977 par E.K.Drexler, un ingénieur issu du MIT, est parmi ceux les plus exploités par la littérature ou le cinéma.

⁴ Le terme déontologie est dérivé de l'anglais *deontology*, substantif forgé par le philosophe anglais Bentham (1748-1832) en vue de désigner une « science de la morale ». Un anglicisme donc, mais lui-même construit à partir de la racine grecque *déon*, signifiant « ce qui convient ». Indiquons cependant que de nos jours, le terme déontologie se distingue des précédents (éthique et morale) moins pour des motifs étymologiques que par le fait qu'il est généralement réservé à la définition d'un ensemble de règles propres à une activité professionnelle, à un métier donné.

Développement durable « Nanotechnologies, nanoparticules. Quels dangers, quels risques ? ». En fin d'année, le comité d'éthique du CNRS (COMETS) qui s'est saisi du sujet rend un « Avis sur les enjeux éthiques des nanosciences et nanotechnologies » peu avant que l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques ne rende son rapport sur « Les nanotechnologies : risques potentiels, enjeux éthiques ». En 2007, c'est au tour du Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé (CCNE) de publier un « Avis sur les questions éthiques posées par les nanosciences, les nanotechnologies et la santé », concomitant à l'avis du Groupe européen d'éthique des sciences et des nouvelles technologies (GEE) sur les aspects éthiques de la nanomédecine. En 2008, les premières normes internationales ISO sur les nanotechnologies sont publiées (d'abord en matière de définition puis sur d'autres questions) et la Commission des communautés européennes sort une recommandation concernant un « Code de bonne conduite pour une recherche responsable en nanosciences et nanotechnologies ».

Si le but de ces normes, rapports et avis est d'encadrer les pratiques des intéressés, l'éthique ne se réduit pas à ces positions officielles. En parallèle, le débat sur les nanotechnologies s'est amplifié dans la société. Il devient public en même temps qu'il apparaît dans les médias en 2004. En France, l'année 2005 voit l'organisation officielle des premiers débats citoyens (à Grenoble par exemple) et premières conférences citoyennes (Vinck, Gallice, Jouvenet, Zarama). Elles se poursuivent à Paris en 2006 autour de la région Île-de-France ou de la Cité des sciences et de l'industrie puis en 2007 et 2008 avec le Nanoforum du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam). Aux initiatives institutionnelles s'ajoutent des réunions publiques promues par la société civile : Nanomonde (Fondation Sciences citoyennes, 2006), Nanovi (Vivagora, 2006), Avicenn (Sciences et démocratie, 2013). Ces dispositifs qui instaurent un débat sociétal sur les nanotechnologies répondent à divers objectifs. Le nanoforum du Cnam par exemple proposait un exercice de « démocratie technique » où il s'agit simplement d'échanger et d'apprendre : son objectif était de constituer un « espace libre, transparent, pluraliste et ouvert (...) réponse à l'incertitude générée par les nanotechnologies » (Cnam). Ces forums hybrides ouvrent des espaces de délibération qui peuvent permettre a priori de gérer les controverses liées aux innovations techniques (Callon et al. 2001) et d'engager une régulation éthique, à condition que soient bien représentées les diverses parties intéressées et, bien sûr, les citoyens (Vinck, Gallice, Jouvenet, Zarama).

En 2009, le débat sociétal sur les nanotechnologies montra combien sont rares et difficiles les conditions pratiques, crédibles ou rationnelles d'une régulation éthique. Fruit du Grenelle de l'environnement de 2007, un débat public sur le développement et la régulation des nanotechnologies est donc organisé au niveau national. Il répond à un engagement inscrit dans un projet de loi (loi 2009-967 du 3 août 2009, article 42). Commandité par sept ministères, le débat est confié à la Commission nationale du débat public (CNDP), instance gouvernementale créée pour faire participer le public sur des grands projets d'infrastructures (sites industriels à risques, voies ferrées, etc.). Cette commission planifie le débat sur cinq mois (octobre 2009 à février 2010). Constatant l'ignorance du public pour le sujet, la commission décide d'aller vers le public, dans des villes concernées par l'implantation d'industries ou de laboratoires travaillant sur les nanotechnologies. La motivation principale était d'informer les citoyens sur les différentes applications industrielles des nanotechnologies et recueillir leurs réflexions. Dix-sept villes furent choisies pour autant de réunions thématiques, qui combinaient à la fois des sujets techniques en lien avec les activités locales et une thématique générale. Une information préalable avait été organisée avec la constitution et la mise à disposition d'une base de données formée d'une cinquantaine de « cahiers d'acteurs », recueil des avis et positions des principales parties

prenantes sur les nanotechnologies. Toutefois, sur les 17 réunions prévues, 8 furent perturbées ou annulées. Certaines ONG bloquèrent la participation au débat public pour dénoncer un débat inutile sur le développement des nanotechnologies, les décisions ayant déjà été prises. Il est vrai que le ministère de la Recherche avait annoncé en mai 2009 la mise en place d'un programme de financement de 70 millions d'euros (Nano-Innov) et que ce débat public arrivait finalement tardivement par rapport à la brève histoire des nanotechnologies en France. L'accès aux réunions fut donc surveillé et parfois encadré par la police. Mais rares sont les participants à avoir été satisfaits des conditions d'échanges (limitées et minutées). Un grand nombre d'enjeux (militaires, libertés individuelles, etc.) ont par ailleurs été laissés de côté (Jouzel, 2010). À la clôture du débat en février 2010, on comptait 3 216 participants aux réunions (au lieu des 10 000 attendus) et 169 717 visites sur le site internet. Officiellement, « le débat n'a pas eu le succès escompté » (Bilan gouvernemental du débat public, 9 avril 2010). Vu par ses opposants comme « une tournée de promotion des nanotechnologies », le débat fut considéré comme un échec.

Les suites du débat intervinrent en 2011, le gouvernement prenant acte que le débat avait « mis en évidence les attentes de la société française en termes d'information, de transparence et de dialogue dans la durée sur le sujet (...) comme d'interrogations concernant les impacts potentiels de ces technologies sur les plans des libertés individuelles et de l'éthique » (communiqué 27 octobre 2011). Ce communiqué accompagnait des engagements destinés à positionner la France au niveau communautaire sur le plan de la « prise en compte des propriétés spécifiques des nanomatériaux au sein des directives et règlements » avec, par exemple, la réglementation sur l'étiquetage des produits mis à disposition du grand public, mais aussi le recensement des substances à l'état nanoparticulaire mises sur le marché⁵, ou encore la création d'un portail d'information interministériel spécifique.

S'ils peuvent paraître exemplaires ou volontaristes, ces engagements ne sont finalement que le résultat normal de l'application du principe de précaution qui s'impose aux autorités publiques françaises en cas d'incertitude scientifique sur des dommages potentiels à l'environnement. En effet, ce principe de précaution, inscrit dans la constitution, oblige les autorités à un processus itératif de recherche d'information et d'évaluation des risques pour la santé. Le rapport Anses d'expertise collective « Nanomatériaux et santé » d'avril 2014 participe d'ailleurs à ce processus. Ce rapport, qui intègre un chapitre Éthique et société civile, développe ainsi les incertitudes soulevées par les nanomatériaux manufacturés. Il rappelle que les points les plus débattus dans le champ des nanotechnologies relèvent de trois questions : surveillance sociale (traçabilité), vivant (nanobiotechnologies) et risques (alimentation-environnement-santé). Il résume quelques éléments du débat et particulièrement les interrogations sur les atteintes potentielles à la santé liées au développement des nanomatériaux, invitant à la prudence. À ce propos, il cite des discussions utilisant la notion de risques « incertains », notion paradoxale qui n'a de sens que dans la tentative de bénéficier d'analyses de risques dans le contexte persistant d'indétermination des matériaux et de leurs effets.

⁵ Ce dispositif de déclaration obligatoire (R-Nano) étant promu en vue d'une déclaration harmonisée en Europe.

La situation et les perspectives éthiques des nanotechnologies

L'étendue des applications des nanotechnologies explique la nécessité et l'importance du débat éthique sur le sujet. Aussi l'élaboration et l'usage de notions telles que celle de nanomatériaux devraient contribuer à délimiter et faciliter le débat. Toutefois, ces notions génériques - aux contours discutables - encadrent le sujet autant qu'elles entretiennent les incertitudes et les difficultés à débattre. Cela pourrait expliquer les valeurs contrastées et instables attribuées aux nanotechnologies.

Depuis leur lancement, les nanotechnologies font l'objet de controverses. Ces controverses sont plus ou moins fortes et étendues au fil du temps. Les risques associés aux nanomatériaux sont des éléments déterminants du débat. C'est à ce titre que les usages des nanomatériaux pour la cosmétique ou l'alimentation ont par exemple été discutés. Alors qu'initialement les propriétés des nanomatériaux ont pu faire figure d'argument commercial, les industriels sont aujourd'hui discrets sur leur présence dans leurs produits. Pourtant les connaissances sur les risques restent encore réduites. Mais la perception des risques dépend généralement du rapport bénéfice/risque associé à la technologie⁶ et dans ces cas, le bénéfice attendu est moindre que les craintes pour la santé. Cela explique pourquoi une réglementation spécifique avec une généralisation de l'étiquetage, longtemps revendiquée par les ONG, a d'abord été élaborée dans ces secteurs sensibles pour le public.

Inscrite dans une culture, l'éthique est associée à des normes sociales et des représentations mentales. Dans un contexte d'incertitude, ces éléments vont déterminer pourquoi des applications sont soutenues et d'autres contestées. C'est le cas des applications médicales des nanotechnologies (les vecteurs de médicament en particulier) qui bénéficient d'une certaine confiance (qui plus est à base de particules organiques, assimilables) alors qu'inversement sont critiquées des chaussettes aux nanoparticules d'argent (biocides) et donc anti-odeurs mais aussi nocives pour l'environnement du fait du rejet dans les rivières après lessives. Pour comprendre les fondements et les mouvements de ces positions éthiques à l'échelle des populations, les agences sanitaires et gouvernementales disposent de divers outils d'enquête quantitative⁷. La pratique du panel d'opinion par exemple est développée tant au niveau européen (Eurobarometers de la Commission européenne) que national. Elle permet de mesurer par enquête de sondage, l'accueil du public en général ou de certaines parties prenantes à l'égard des technologies.

Concernant les nanotechnologies, les dernières enquêtes disponibles montrent d'abord une faible connaissance du sujet au niveau européen : malgré d'importantes disparités entre les pays du Nord et du Sud en 2010, en moyenne en Europe, 54 % des personnes ne savaient pas ce que recouvrait le sujet des nanotechnologies (aboutissant au mieux à des réponses de type : c'est l'Ipod Nano ?). Et d'autres enquêtes montrent qu'en

⁶ Rapport OSHA Europa 2012, Risk perception and risk communication towards nanomaterials.

⁷ Saisir les tendances dans la perception des technologies est particulièrement important pour ceux qui gouvernement compte tenu des effets de la réceptivité du public sur le développement et l'exploitation des technologies en particulier dans un contexte historique récent marqué par la résistance aux biotechnologies (OGM, etc.) ou à l'extraction des gaz de schiste.

dépit de son développement, l'information disponible change peu cette perception... En France, les résultats varient légèrement, seulement 46 % des français interrogés n'étaient pas capables de situer le sujet (figure 1).

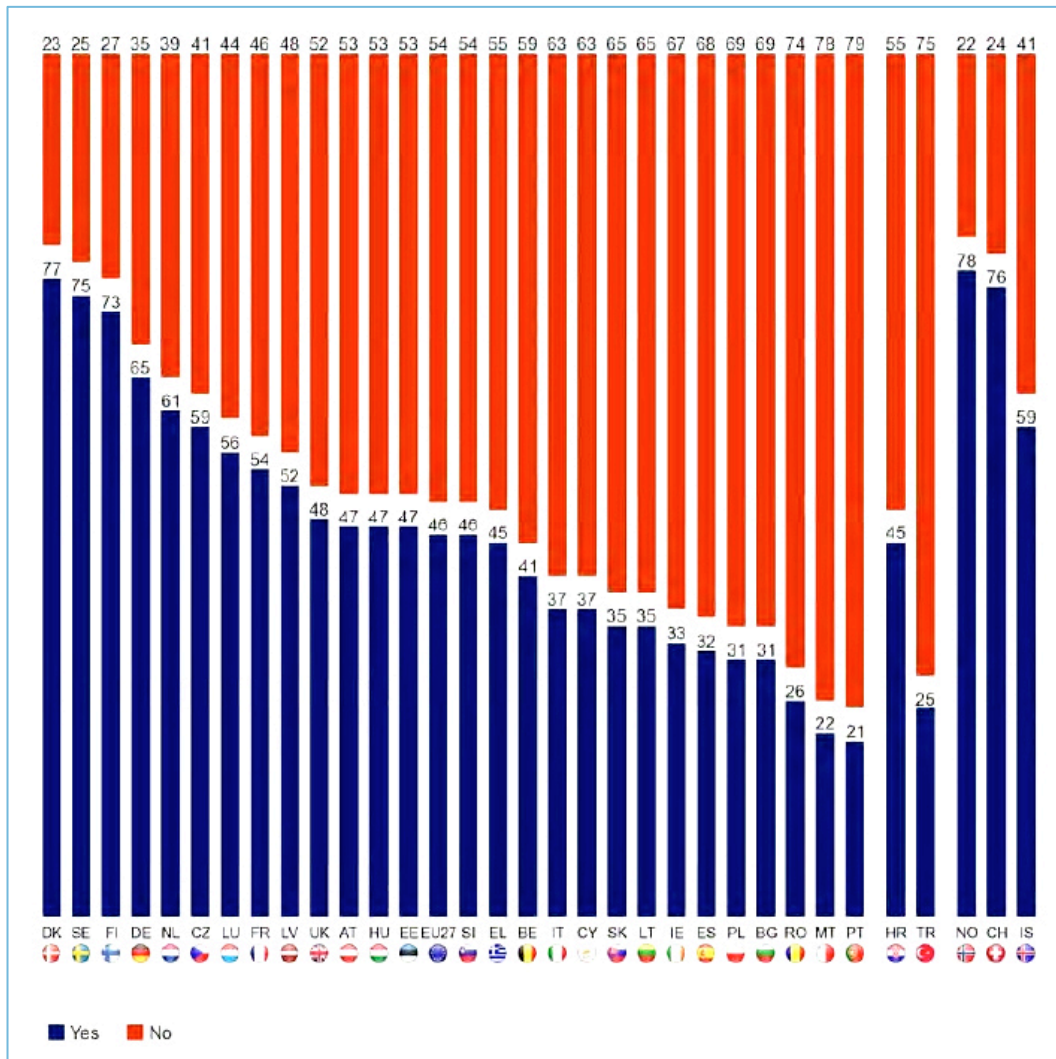


Figure 1. Have you ever heard of nanotechnology before ?

Source : histogramme extrait de l'Eurobaromètre n°341

Au-delà de la connaissance sur les technologies, la perception des risques mais aussi des bénéfices associés aux technologies ou encore la confiance dans la science sont des critères de mesure utiles pour comprendre les réactions des populations. Ces questions sont intégrées en France dans un baromètre annuel réalisé par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). En effet, l'IRSN a retenu la pratique des enquêtes pour suivre les opinions des Français au sujet des risques liés à la radioactivité. Les résultats des sondages réalisés sont restitués annuellement dans le « Baromètre IRSN sur la perception des risques et de la sécurité », créé en 1990 sous sa forme actuelle. Une trentaine de thèmes fait l'objet d'un suivi comparatif dans le temps. Le sujet des nanomatériaux a été intégré en 2009 dans la liste des thèmes étudiés. Ce suivi des opinions offre, à tous les acteurs qui contribuent à la maîtrise et à la gestion du risque nucléaire et au-delà, des connaissances sur la manière dont le grand public met en perspective les différents risques, sur sa perception de la qualité de leur gestion et sur ses attentes en matière d'information (figure 2).

OCTOBRE 2013

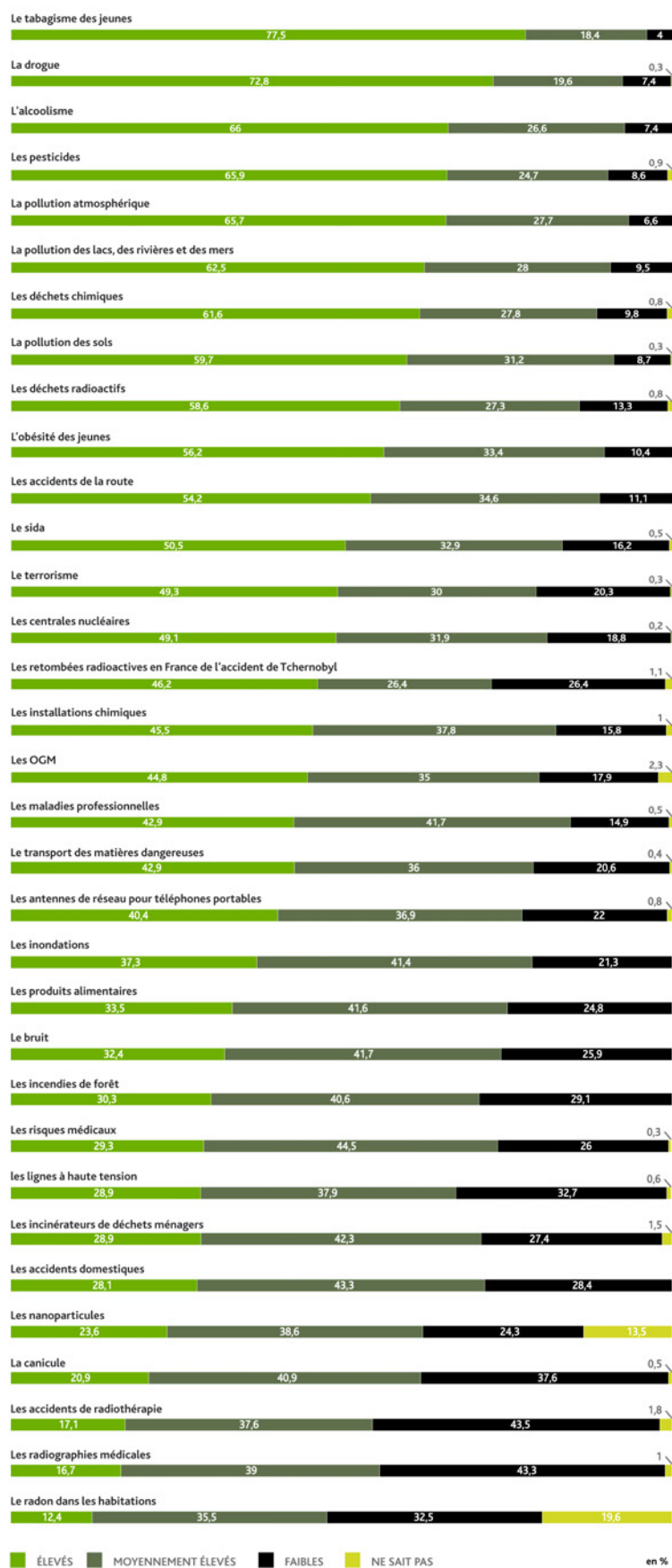


Figure 2. Dans chacun des domaines suivants, considérez-vous que les risques pour les Français en général sont...

Source : extrait du baromètre IRSN 2014 p. 64-65

Dans les résultats de l'enquête, le thème des nanoparticules (ainsi formulé dans le questionnaire) se distingue d'autres situations à risque pour plusieurs raisons. D'abord, il arrive en queue de classement des préoccupations en termes de risques pour les Français (29^e sur 33 en 2013) ce qui peut paraître positif pour le sujet. Pourtant une majorité de répondants lui attribuent des risques élevés ou moyens (au total 64,2 %) contre 24,3 % des risques faibles. Et avec les pesticides ou la pollution des sols, il apparaît comme l'un des thèmes pour lesquels la confiance dans les autorités françaises pour leurs actions de protection des personnes est la plus faible (12 % de confiance, 37,5 % plus ou moins et 36 % de non) et surtout pour lequel le sentiment de vérité des informations sur les dangers est le plus bas (près de 50 % de non). Néanmoins les nanoparticules, avec le radon dans les habitations, sont les deux situations à risques qui cumulent le plus de non-réponses sur les risques respectivement (13,5 % et 19,6 % en 2013) révélant une ignorance des Français pour le sujet et confirmant les résultats des enquêtes internationales sur la faible information des populations.

Ces résultats sont relativement stables d'une année sur l'autre, indiquant une faible évolution de la perception des Français sur le sujet. Cette donnée est une des particularités des nanomatériaux, qui semblent ne pas bénéficier d'un renforcement de l'information les concernant au fil du temps, du fait de leur complexité scientifique

notamment. En complément, d'autres études montrent qu'à leur propos, de larges pans de la population ne se prononcent pas sur le rapport bénéfice/risque des nanotechnologies en général, formant un « ventre mou » susceptible de basculer en faveur ou à l'encontre des nanomatériaux en fonction des applications proposées. Comme si, au gré de leur développement, à l'indétermination des nanomatériaux se conjugait une indétermination éthique ! Des études sur la perception des risques, il ressort néanmoins que l'attitude à l'égard de l'écologie semble être la variable la plus étroitement corrélée aux positions défendues par les personnes à l'égard des nanotechnologies.

Dans ce contexte, les incertitudes relatives aux déterminants du débat éthique et de ses régulations tiennent d'abord aux types d'application des nanomatériaux appelées à se diffuser dans la société et leur visibilité, mais aussi aux normes et réglementations mises en place à leur égard et l'information disponible sur les risques et les bénéfices escomptés. Ces éléments permettent d'esquisser deux hypothèses d'évolution de la régulation éthique et donc du climat social relatif aux nanomatériaux à venir.

Hypothèses

Hypothèse 1

La première hypothèse est celle d'une régulation éthique relativement continue, qui permet le débat scientifique, l'expression des controverses et reconnaît globalement l'intérêt du développement de la production et de l'utilisation des nanomatériaux. L'application du principe de précaution permet à l'État de garder un rôle actif dans cette régulation par une information régulière des citoyens. La définition très large de la notion de nanomatériaux est conservée ; elle permet de concilier les attentes des différentes parties prenantes. Ces dernières créent des occasions régulières d'expression et d'information. La connaissance des nanomatériaux bien que peu diffusée est bien appropriée par les acteurs de la société civile. Des controverses latentes peuvent renaître localement à l'occasion de certains programmes d'investissement ou de développement d'applications remettant en cause les libertés individuelles (puces RFID et autres traçeurs), forçant alors à la production d'information, mais le débat permet des ajustements techniques ou normatifs qui encadrent clairement l'activité.

Hypothèse 2

La seconde hypothèse suggère une régulation éthique sporadique, survenant à l'occasion d'affaires ou d'applications discutables des nanosciences. Cette régulation mène à un rejet massif de certains produits en raison de principes moraux ou de crainte sur la dangerosité. Le rejet se fonde sur un débat scientifique discontinu et une expression conflictuelle des controverses difficile à arbitrer. Ce contexte limite régulièrement le développement de la production et de l'utilisation des nanomatériaux, ce qui freine ponctuellement la recherche et les investissements. La défiance à l'égard de l'État dans son application du principe de précaution, l'exclut de son rôle traditionnel d'arbitrage dans cette régulation. La définition trop large de la notion de nanomatériau est critiquée, détournée ; elle exige des

renouvellements et des déclinaisons spécifiques dans chacun des domaines d'application des nanotechnologies (énergies, santé, environnement, etc.) qui en appellent à des normes et réglementations spécifiques. La notion de nanomatériau est donc abandonnée car ne pouvant être considérée comme une catégorie homogène. La connaissance des nanomatériaux se diffuse au gré des marchés et elle est peu coordonnée à l'échelle de la société compte tenu de la multitude de caractéristiques et d'applications qui ont été découvertes. Chaque controverse, qui est largement reprise sur les réseaux sociaux alimente cependant le débat international et condamne pour longtemps les acteurs de la filière concernée. L'absence de coordination procure un sentiment réservé de la population à l'égard des nanotechnologies. Toutefois l'opinion publique est moins indécise et s'affirme davantage, tant du côté des défenseurs que des opposants à certaines applications. Le débat éthique se règle finalement localement par des arbitrages autour des questions d'emploi, de croissance ou de ressources associées aux procédés industriels ou de recherche.

Références

- Commission européenne, Eurobaromètre spécial n°341, octobre 2010.
http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_341_en.pdf
- David, K et Thompson D.B. (dir.), *What Can Nanotechnology Learn From Biotechnology? Social and Ethical Lessons for Nanoscience from the Debate over Agrifood Biotechnology and GMOs*, 2008.
- IRSN, Baromètre annuel des risques et de la sécurité, 2013.
http://www.irsn.fr/FR/IRSN/Publications/barometre/Documents/IRSN_barometre_2013.pdf
- OSHA-Europa, Risk perception and risk communication with regard to nanomaterials in the workplace, 2012.
- Savolainen K. (coord.), *Nanosafety in Europe 2015-2025: Towards safe and sustainable nanomaterials and nanotechnology innovations*, 2013.

Les risques pour la santé

Stéphane Binet, INRS et Nathalie Thieriet, Anses

Définition

Cette fiche traite des risques, immédiats ou à long terme, pour la santé humaine associés au développement des nanomatériaux manufacturés.

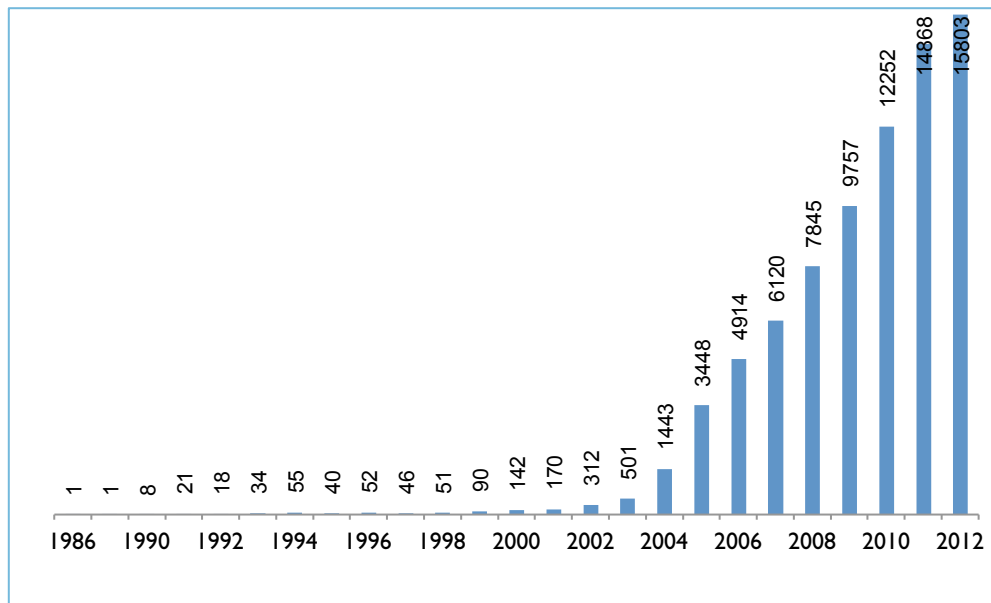
Quel que soit le secteur concerné (travail, consommation...), l'évaluation des risques sanitaires est classiquement basée sur l'identification des dangers, la définition de relations dose-réponse, le repérage et l'évaluation des expositions et enfin la caractérisation des risques, résultant de l'exposition à un danger.

Les nanomatériaux représentent un domaine de la recherche et de l'industrie française et mondiale en pleine expansion. La population susceptible d'être exposée est par conséquent appelée à croître de façon importante que ce soient les consommateurs ou les salariés des secteurs de l'alimentation, de la chimie, de la pharmacie, de la cosmétique, etc.

La mise en place depuis le 1^{er} janvier 2013 de l'obligation de déclaration des substances à l'état nanoparticulaire révèle, dans son bilan annuel, d'importants tonnages concernant les substances à l'état nanoparticulaire produites, importées et distribuées en France en 2012 : la quantité agrégée de ces substances produites en France est de 282 014 tonnes ; la quantité agrégée de substances importées en France est de 222 090 tonnes ; le nombre total de catégories de substances à l'état nanoparticulaire déclarées est compris entre 243 et 422.

Bien que le nombre de publications sur les nanomatériaux recensé dans la base de données américaine PubMed¹ spécialisée en médecine et sciences du vivant, soit en forte croissance (figure ci-après) les études relatives aux effets sanitaires des nanomatériaux ne concernent qu'environ 8 % du nombre global des publications scientifiques disponibles.

¹ <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>



Évolution du nombre de publications scientifiques (mot clé nanomaterial sur le site internet PubMed spécialisé en médecine et sciences du vivant)

Source <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=nanomaterial>

Rétrospective

Les nanomatériaux sont constitués de structures élémentaires dont au moins une des dimensions est à l'échelle nanométrique. Cette caractéristique dimensionnelle est susceptible de conférer aux matériaux des propriétés ou comportements particuliers, laissant entrevoir de nombreuses applications plus ou moins innovantes. Compte tenu de ces possibles effets d'échelle, des différences notables en matière d'évaluation du risque sanitaire sont également probables.

Les propriétés physico-chimiques et les effets biologiques des nanomatériaux sont fonction d'une combinaison de paramètres, dont celui de la nature chimique de la substance, modulés par d'autres caractéristiques telles que, par exemple, la taille et la forme des particules. Dans cette logique, l'ISO qui a créé un comité technique spécifique aux nanotechnologies en 2005 (ISO TC229) a identifié huit paramètres physicochimiques clés des nano-objets et leurs agrégats et agglomérats (NOAA) manufacturés à caractériser en préalable à toute étude toxicologique. Considérant l'importance de l'ensemble de ces paramètres pour l'évaluation des risques des nanomatériaux, le paradigme simpliste consistant à assigner une toxicité unique en fonction d'un seul de ces paramètres, telle que par exemple la nature chimique de la substance, n'est pas acceptable pour ces objets.

Par conséquent, non seulement les données toxicologiques disponibles pour une substance ne sont pas nécessairement applicables aux nanomatériaux de cette même substance, mais également, dans la continuité de ce raisonnement, les informations toxicologiques recueillies pour un nanomatériau d'une substance donnée (dioxyde de titane par exemple) ne sont pas directement extrapolables à un autre nanomatériau de cette même substance, si leurs caractéristiques physicochimiques ne sont pas identiques

(par exemple, les connaissances accumulées en toxicologie sur les particules d'or, issues d'études effectuées avec des particules de dimensions d'ordre micrométrique, ne peuvent être utilisées pour des nanoparticules d'or²).

Ainsi pour évaluer les risques sanitaires liés aux nanomatériaux et à leurs usages, le recueil de nombreuses données, en particulier concernant leur caractérisation physicochimique, est nécessaire. Cette exigence est encore plus importante dans le cadre d'une étude de risque portée sur plusieurs étapes du cycle de vie pour un nanomatériau, puisque ses caractéristiques physicochimiques sont susceptibles d'être modifiées en fonction des étapes.

Des données complexes à générer

La caractérisation physico-chimique des nanomatériaux manufacturés en amont de toute étude toxicologique s'avère primordiale afin d'identifier les objets étudiés puis de permettre d'évaluer les résultats issus de ces essais, de les comparer entre eux et d'aider à leur interprétation. S'il existe actuellement un large consensus sur cette nécessité de caractérisation, il demeure a priori impossible de déterminer une hiérarchie parmi ces paramètres (classement par ordre d'importance ou de pertinence), qui peut varier d'un nanomatériau à un autre. Dans la pratique, la mise en œuvre de cette étape analytique et l'utilisation de ces résultats demeurent sources de controverses.

En effet, les méthodes analytiques actuellement proposées ne sont pas toujours bien adaptées à l'étude des nanomatériaux et ces limitations techniques peuvent générer des biais expérimentaux. Par ailleurs, il est impossible de déterminer une technique unique de caractérisation pour un paramètre physico-chimique donné qui soit applicable à l'ensemble des nanomatériaux. Il en résulte que plusieurs méthodes de caractérisation (technique analytique et protocole expérimental) co-existent et les résultats issus de ces différentes méthodes de caractérisation peuvent s'avérer difficilement comparables.

À ces complications techniques s'ajoute une problématique d'ordre plus fondamentale : certaines caractéristiques, d'intérêt pour la caractérisation, telles que la charge surfacique des particules ou l'état d'agrégation/agglomération dépendent de facteurs expérimentaux. Par exemple avec le temps un effet de sédimentation peut apparaître et modifier ainsi l'état d'agrégation/agglomération initial. De même la charge de surface d'un nanomatériau peut varier en fonction de l'utilisation de solutions plus ou moins concentrées en ions. Aussi, pour un nanomatériau donné, il ne peut donc pas exister de valeurs uniques à ces paramètres, mais des résultats obtenus dans des conditions particulières (scénarios), qui doivent être fixées de la manière la plus pertinente pour l'étude biologique visée.

Au-delà de cette difficulté associée à la caractérisation des nanomatériaux, les lignes directrices utilisées pour les essais toxicologiques des substances chimiques classiques ne sont pas toujours adaptées à l'étude des nanomatériaux, de même qu'elles ne le sont pas pour les types de substances non solubles dans l'eau. Des travaux initiés en 2006 à l'OCDE en vue de leur adaptation sont toujours en cours. Il n'existe donc pas à l'heure actuelle de protocole expérimental communément admis permettant d'évaluer avec certitude la toxicité de ces objets et applicable à l'ensemble des nanomatériaux manufacturés. Afin de produire des résultats scientifiquement acceptables, les protocoles d'essais toxicologiques employés doivent être adaptés au cas par cas de la manière la plus pertinente possible.

² Panyala, N. R., Peña-Méndez, E. M., & Havel, J. (2009). Gold and nano-gold in medicine: overview, toxicology and perspectives. *Journal of Applied Biomedicine*, 7(2).

L'état des connaissances actuelles ne permet pas de disposer d'une méthode générale pour extrapoler les données toxicologiques d'un nanomatériau manufacturé à un autre sur la base de leurs différences de caractérisation physico-chimique : chaque cas est particulier et mérite son analyse.

Enfin, rien ne permet de dire que les publications sur les nanomatériaux adoptent la même définition de ce qu'est un nanomatériau, ce qui constitue un élément supplémentaire d'incertitude. En effet, même s'il existe désormais une définition institutionnelle des nanomatériaux, recommandée par la Commission européenne, le caractère scientifique de son contenu fait toujours débat.

Des expositions complexes à quantifier et à exprimer

Les travaux menés jusqu'ici dans le domaine de l'évaluation des risques des nanomatériaux (Anses 2010 ; Hunt et Riediker 2011 ; Kuhlbusch, Asbach *et al.* 2011 ; Maynard 2007 ; Olabarrieta, Zorita *et al.* 2012 ; Van Landuyt, Hellack *et al.* 2014) ont mis en évidence diverses difficultés, à commencer par de fortes limites au niveau de l'évaluation de l'exposition (limites techniques de l'appareillage existant, distinction des contributions spécifiques des nanomatériaux manufacturés dans un bruit de fond non négligeable, dynamiques temporelles rapides, etc.). Néanmoins, de fortes progressions de la métrologie appliquée aux nanomatériaux ont été observées ces dernières années et tendent à réduire ces difficultés.

Sur un plan plus fondamental, la détermination d'une unité de mesure de quantification des nanomatériaux permettant d'assurer la comparabilité des résultats constitue l'un des enjeux majeurs actuels. Objet de réflexion au niveau international depuis quelques années, il ne semble cependant pas émerger pour l'instant de système d'unité harmonisé qui puisse répondre de manière complètement satisfaisante aux critères de faisabilité métrologique et de pertinence biologique.

Ainsi, l'emploi de la concentration massique, couramment usitée pour des raisons de simplicité métrologique, est remis en cause pour définir des effets biologiques. En effet, il semble maintenant généralement admis que les effets des nanomatériaux soient plus associés à la surface développée de ces particules lors de l'exposition et/ou au nombre de particules concernées plutôt qu'à leur masse (Oberdorster, Oberdorster *et al.* 2007). Un nombre croissant de chercheurs en toxicologie expriment et comparent les résultats de leurs études en quantifiant les doses utilisées sous forme de nombre de particules ou bien de surface spécifique biologiquement accessible, ce qui sous-entend cependant de nombreuses hypothèses de calcul (distribution homogène des nano-objets en termes de composition et de morphologie, ce qui est rarement le cas).

Un nanomatériau susceptible d'évoluer au cours de la vie du nano-produit

Si des efforts importants sont menés en termes de recherche en toxicologie afin de générer des données utiles à l'évaluation des risques, la quasi-totalité de ces travaux sont réalisés sur les nanomatériaux manufacturés d'origine.

Or, les nanomatériaux sont extrêmement réactifs, ils sont donc susceptibles de réagir avec leur environnement et de voir leurs propriétés modifiées. L'analyse des risques liés à un produit suppose de prendre en compte ses évolutions.

Des lacunes de connaissances qui entravent le déroulement correct de l'évaluation quantitative des risques

Proposée pour la première fois en 1983 par l'Académie des sciences (National Research Council) aux États-Unis, la méthode d'évaluation quantitative de risques sanitaires (EQRS) constitue un outil maintenant classique d'évaluation des risques sanitaires (NAS 1983). Son principe, tel que défini par ses concepteurs, repose sur « l'utilisation de faits scientifiques pour définir les effets sur la santé d'une exposition d'individus ou de populations à des matériaux ou à des situations dangereuses ».

L'expression du risque pour cette démarche d'évaluation est basée sur le croisement de l'exposition à une substance avec son danger intrinsèque.

Appliquée au cas des nanomatériaux, le principe de cette démarche quantitative se heurte à la difficulté d'estimer l'exposition en fonction du scénario retenu et à l'insuffisance flagrante de données, notamment toxicologiques, spécifiques au nanomatériau étudié (Anses 2010). La mise en œuvre de l'évaluation quantitative des risques ne peut aboutir qu'à l'identification des lacunes de connaissances.

Dans la pratique, depuis l'établissement du règlement européen REACH, toute substance chimique mise sur le marché (pour les quantités supérieures à 1 tonne) doit faire l'objet d'une évaluation de danger par le producteur, distributeur ou importateur. Ces nanomatériaux manufacturés font donc réglementairement l'objet d'évaluations de danger et/ou de risque, cependant celles-ci répondent peu souvent aux exigences de spécificité liées au produit lui-même et n'en garantissent donc pas l'innocuité.

Dans le cadre de travaux d'un projet européen intitulé NanoImpactnet³, les incertitudes et complexités inhérentes aux nanomatériaux à la source de ces difficultés d'évaluation ont été analysées (Hunt et Riediker 2011). Au-delà de ces considérations de disponibilité de l'information, des limites méthodologiques ont été identifiées pour l'application de l'EQRS aux nanomatériaux (Anses 2010 ; Boize, Borie *et al.* 2008 ; Hunt et Riediker 2011). De récents travaux sur les nanomatériaux laissent supposer que la réponse biologique pourrait s'avérer non monotone, c'est-à-dire que des effets biologiques pourraient être observés uniquement à faibles concentrations de nanomatériaux (Nanogenotox 2012). Cette observation est peut-être expliquée par une plus grande biodisponibilité pour des faibles doses de nanomatériaux (particules élémentaires isolées à faible concentration, mais agrégées à plus fortes concentrations). Ceci contribue à rendre encore plus difficile l'évaluation quantitative des risques.

En réponse aux difficultés soulevées par les nanomatériaux en matière d'évaluation des risques sanitaires (plusieurs démarches alternatives d'évaluation des risques et outils destinés à guider l'action (gestion des risques), dans un tel contexte d'incertitude sont actuellement disponibles. Chaque méthode est conçue pour répondre à des objectifs différents (exemples : aide à la prévention des risques professionnels, hiérarchisation de risques pour des nano-produits, etc.). Elle se focalise sur des objets distincts (exemples : nanomatériaux, nano-produits, nanoparticules uniquement, etc.) et pour des cibles spécifiques (exemples : consommateur, population générale, travailleur, etc.). Par exemple, le comité scientifique pour la sécurité des consommateurs a récemment publié un guide pour l'évaluation des nanomatériaux des produits cosmétiques⁴. En conséquence, leurs principes de fonctionnement et logiques mises en œuvre sont souvent hétérogènes.

³ <http://www.nanoimpactnet.eu/>

⁴ http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/consumer_safety/docs/sccs_s_005.pdf

Prospective

En dépit des avancées indiquées ci-dessus, les connaissances concernant la toxicité et l'exposition restent parcellaires et il est encore très difficile de se prononcer sur le risque sanitaire lié à l'utilisation de tel ou tel nanomatériau dans tel ou tel produit de la vie courante.

Une évaluation de risque systématique au cas par cas n'est pas envisageable pour la prise en charge à court ou moyen terme de la situation actuelle, compte tenu des délais qu'elle impliquerait et de l'utilisation extensive d'animaux de laboratoire qu'elle supposerait. Aussi pour dépasser les limites imposées par cette approche, il est opportun de développer et d'évaluer la pertinence de nouvelles approches alternatives permettant une évaluation des risques telles que :

- les approches de gestion des risques fondées uniquement sur une évaluation graduée de ces derniers ; certains outils sont déjà publiés ;
- les catégorisations par effets ou selon les propriétés physico-chimiques, en cours de réflexion mais qui ne sont pas suffisamment abouties ;
- les approches dites *safer by design / by process* apparaissent comme des solutions alternatives intéressantes qu'il est nécessaire d'évaluer afin d'en démontrer l'efficacité.

Toutes ces approches doivent par ailleurs s'accompagner systématiquement d'une évaluation de l'exposition tout au long du cycle de vie des nanomatériaux.

Hypothèses

Hypothèse 1. La survenue d'effets sanitaires graves non anticipés

Cette hypothèse suppose une faible prédictivité des outils relatifs à l'évaluation des dangers (santé) et des expositions (mesure). Certains nanomatériaux (très répandus ou relargage accidentel) dont les dangers potentiels auront été sous-évalués ou ignorés induisent au terme de plusieurs années la survenue d'effets sanitaires graves et très médiatisés.

Hypothèse 2. La survenue d'effets sanitaires graves anticipés

Dans ce cas, nous supposons une bonne prédictivité des outils relatifs à l'évaluation des dangers (santé) et des expositions (mesure) mais l'évaluation des risques à long terme aura prévu des effets graves pour l'homme (et l'environnement) pour une proportion significative des nanomatériaux (voire tous les nanomatériaux indistinctement = risque systémique lié aux caractéristiques dimensionnelles). L'absence de décision politique, dont une des causes pourrait être la crainte d'un fort impact économique en cas d'interdiction d'utilisation, entraîne la survenue d'effets sanitaires. Mêmes conséquences que supra.

Hypothèse 3. Les effets sur la santé ne sont pas spécifiques par rapport aux autres agents chimiques (pas de crise)

Cette hypothèse suppose une bonne prédictivité des outils relatifs à l'évaluation des dangers (santé) et des expositions (mesure). Les risques sanitaires, évalués *a priori* (avant commercialisation) sont établis comme très différents d'un nanomatériau à l'autre et, globalement, les nanomatériaux ne représentent pas un risque global pour la santé ou l'environnement spécifiquement plus élevé par rapport aux autres agents chimiques. Chaque nanomatériau se place dans un continuum d'effets anticipés par la recherche en toxicologie : du plus grave au plus « anodin ».

Hypothèse 4. Des effets sanitaires éventuels sans crise déclarée

Restrictions catégorielles de l'usage de certains nanomatériaux utilisés au plus près du consommateur (alimentation, cosmétique) car, même en l'absence d'effets sur la santé objectivés, il aura été prouvé que ces nanomatériaux se diffusent dans l'organisme et s'y accumulent.

Hypothèse 5. Les risques sanitaires restent difficilement évaluable

Actuellement, l'écart de connaissances entre le progrès technologique et la recherche en nanosécurité est estimé à 10-20 ans. En effet, les recherches visent essentiellement à développer de nouveaux nanomatériaux et nanotechnologies, alors que les moyens alloués (tous secteurs confondus, public ou privé) aux recherches sur leurs effets potentiels sur la santé sont insuffisants. Dans le cas où n'émergerait pas d'outils à haut débit d'évaluation des dangers (toxicologie...), cet écart se maintiendra ou sera susceptible de croître.

Les risques pour l'environnement

Stéphane Binet, INRS

Définition

Cette fiche variable traite des risques pour l'environnement, immédiats ou à long terme, associés au développement des nanomatériaux manufacturés (NM).

L'objet de cette fiche est les particules nanostructurées provenant de sources fabriquées intentionnellement (nanomatériaux...) et non les particules ultrafines de l'environnement, nanostructurées elles aussi, mais qui proviennent de sources environnementales (volcans...) et de la pollution urbaine ou industrielle (particules diesel, fumées de soudage, cendres volantes, ROFA (*Residual oil fly ashes*)).

Le champ de cette variable est suggéré par deux définitions :

- par environnement, entendre les écosystèmes, c'est-à-dire les systèmes formés par un environnement (biotope) et par l'ensemble des espèces (biocénose) qui y vivent, s'y nourrissent et s'y reproduisent (définition Larousse) ;
- l'écotoxicologie est la branche de la toxicologie qui s'intéresse dans un contexte intégré à l'étude des effets toxiques causés par les polluants naturels ou synthétiques, aux constituants des écosystèmes : animaux (y compris l'homme), végétaux et microbiens (Truhaut, 1977).

L'utilisation de nanomatériaux, appelée à se généraliser dans les prochaines années du fait de leurs nouvelles propriétés physiques, chimiques ou biologiques, représente un risque pour l'homme et les écosystèmes. Sont par conséquent à distinguer pour cette variable :

- les risques pour la population générale, via l'utilisation ou la consommation de produits contenant des nanomatériaux (produits d'hygiène corporelle, médicaments, emballages alimentaires, vêtements...), ainsi que via la contamination environnementale par l'exposition aux déchets, eaux de consommation, air, sols (nanoparticules ou nano-objets résultant de l'usure ou de la fin de vie des nanomatériaux contenus dans les pneumatiques, les encres, les essences, ou déposés sur les façades, les vitrages, les panneaux solaires...);

- les risques pour l'environnement (écosystèmes) via (1) une contamination provenant de nanomatériaux dédiés à l'usage humain (médicaments, emballages, objets...) et (2) l'utilisation de nanomatériaux pour tout autre usage (décontamination des sols...).

Ne seront traitées dans cette fiche que les risques pour les écosystèmes et non ceux relatifs aux effets sur la santé humaine résultant de la contamination environnementale :

- les impacts sur l'air, les sols et les eaux ;
- les impacts sur la faune et la flore.

Une donnée de départ importante relativement aux évolutions de la variable est la constatation que les efforts de recherche dirigés vers l'étude du devenir et des impacts potentiels des déchets générés par cette technologie sont insuffisants (moins de 5 % du financement consacré à développer de nouveaux NM). En particulier, les études portant sur les conséquences écotoxicologiques des nanomatériaux n'incluent pas la détermination du cycle de vie et les effets des nanoparticules (NP) elles-mêmes et ceux des polluants (organiques ou minéraux) qui pénètrent dans l'environnement associés aux NM (Gao, 2008).

Rétrospective

Un élément de contexte est donné par les importants tonnages relevés dans le bilan 2013 sur les substances à l'état nanoparticulaire produites, importées et distribuées en France en 2012 : la quantité agrégée de ces substances produites en France est de 282 014 tonnes ; la quantité agrégée de substances importées en France est de 222 090 tonnes ; le nombre total de catégories de substances à l'état nanoparticulaire déclarées est compris entre 243 et 422.

Les préoccupations de la recherche sur les impacts environnementaux des NP sont apparues tardivement, à partir de 2006 si on juge par une recherche bibliométrique sur l'ISI Web of Science (Kahru, 2010). La bibliométrie, actualisée en février 2014, indique aussi que la montée en puissance de ces recherches est lente : en effet, seulement 263 enregistrements sur les mots clés "*nanoparticle* AND ecotoxicity*" [*field: topic*] et 574 après l'utilisation de mots clés plus larges (« *nano* ecotox** » [*field: topic*]). On constate aussi que les données quantitatives sur les effets écotoxicologiques des NP sont encore rares, que ce soit au niveau d'organismes simples, de communautés simplifiées ou d'écosystèmes entiers, alors qu'elles sont requises pour l'évaluation des risques et à des fins réglementaires.

L'urgence de comprendre les effets biologiques des nanomatériaux a produit un nombre croissant de recherches sur les dangers d'une exposition humaine ou de l'environnement mais, actuellement, nous avons une connaissance très insuffisante de la nature des nanomatériaux qui sont effectivement libérés, de leur devenir et des effets des nanomatériaux altérés et âgés. L'évaluation du risque pour les écosystèmes représente un défi sans doute plus diversifié que celui relatif à la santé humaine, car il implique de nombreux champs disciplinaires : physiciens et spécialistes des matériaux mais aussi ingénieurs en environnement, pour quantifier la libération des particules, chimistes,

biologistes, toxicologues, afin de caractériser les transformations des produits initiaux, la biodisponibilité et la toxicité dans les différents réseaux trophiques (chaînes alimentaires reliées entre elles au sein d'un écosystème) (Klaine, 2012).

Les écotoxicologues utilisent des méthodes d'essai normalisées (par exemple l'OCDE ; tout comme les toxicologues,) et, de ce fait, traitent majoritairement les nanomatériaux de la même manière que les produits traditionnels pour lesquels ces méthodes ont été conçues (Park et al., 2014) : ils supposent *a priori* que les nanomatériaux se comportent comme les contaminants solubles et adaptent ces essais dans le cadre de la nanoécotoxicologie. Cette décision provient du fait que (1) développer une méthode d'essai peut prendre plusieurs dizaines d'années alors que, pendant ce temps, les nanomatériaux sont déjà là, et (2) la recherche sur la santé environnementale et sur la sécurité des nanomatériaux reçoit moins de 5 % du financement consacré à développer de nouveaux nanomatériaux !

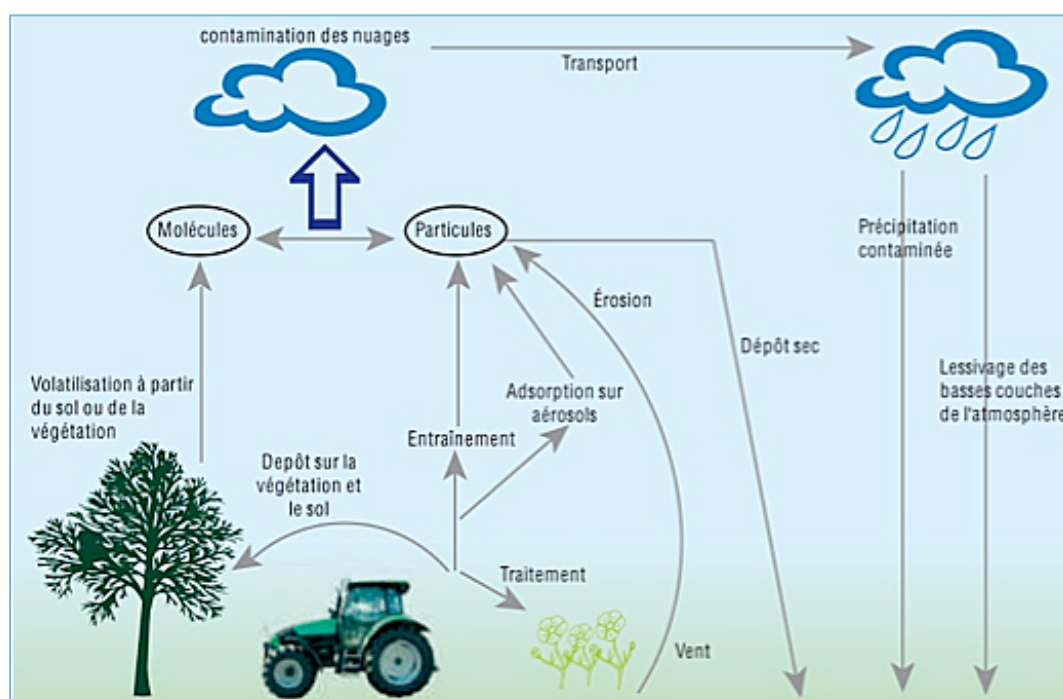
Il est à présent acquis que les processus biogéochimiques intervenant sur le devenir et le transport des nanomatériaux après leur libération, incluent notamment la transformation photochimique, l'oxydo-réduction, la dissolution, précipitation, adsorption, désorption, la combustion, la biotransformation et l'abrasion sans oublier des modifications de leurs propriétés d'agglomération et d'agrégation (en fonction des modifications de surface, dégradation du *coating*) et la sédimentation (Nowack, 2012). La connaissance de ces processus géobiochimiques est seule susceptible de permettre un choix pertinent des essais écotoxicologiques à entreprendre pour l'évaluation au cas par cas des dangers, et permettre, par des ajustements de ces essais, que ces derniers prévoient mieux les dangers (Park et al., 2014).

Quelques exemples

- Selon Kahru et al. (2010), les organismes d'essai les plus sensibles aux NPs (TiO₂, ZnO, CuO, Ag, MWCNT et C₆₀) étaient les algues et les crustacés révélant la vulnérabilité des groupes d'organismes appartenant à la chaîne alimentaire aquatique.
- Le nano-Ag° nanoparticulaire peut libérer le cation Ag⁺ sur une période allant de quelques heures à quelques jours ; secondairement, ce cation peut subir une transformation en sels insolubles ou solubles d'Ag influençant la toxicité selon les conditions d'oxydo-réduction du milieu (Nowack, 2012).
- L'évaluation de l'écotoxicité du produit d'origine n'est pas représentative de tous les effets susceptibles de survenir (Gao, 2008). Les nanocomposites mésoporeux SiO₂-TiO₂ présentent une grande surface spécifique (> 300 m²/g) et sont de meilleurs photocatalyseurs que le TiO₂ : sur la base de ces propriétés, ils pourraient être utilisés pour la purification des effluents contaminés contenant des produits organiques (colorants... ; Siddiqa, 2013). Les effluents peuvent contenir aussi d'autres toxiques tels des métaux (par exemple le mercure) susceptibles de s'adsorber dans le nanocomposite puis d'être relargués au cours du cycle de vie du nanocomposite dans les systèmes naturels (cours d'eau...). Il s'agit d'un exemple de type avantages/inconvénients pour lequel les inconvénients imposent la nécessité de recherches portant sur les déchets nanos hautement contaminés, qu'il serait nécessaire de traiter avant mise en centre d'enfouissement technique (CET).
- Les données quantitatives nano-écotoxicologiques qui existent actuellement sur des modèles d'organismes simples classeraient les NP de « très toxique » à « nocif ». Aucune des NP étudiées dans la revue de la littérature de Kahru et Dubourguier (2010) n'a été classée comme « non nocive ». Actuellement, ni le cycle de vie des

matériaux nanométriques, ni leur impact sur les animaux, les plantes ou les communautés d'organismes des sols n'ont été étudiés *in situ* alors que cela serait nécessaire pour la validation des modèles proposés pour l'évaluation des risques environnementaux des NP.

En conclusion, les nanoparticules sont dès à présent introduites dans les écosystèmes terrestres et aquatiques et il est prévisible que le développement des nanotechnologies donnera lieu à un accroissement de ces apports, en quantité et diversité. L'évaluation des conséquences environnementales futures doit prendre en considération, la nature et l'importance des sources, les mécanismes et voies de transfert (atmosphère, eaux de ruissellement, rejet direct), les compartiments de stockage (eau, sols, sédiments), les espèces cibles et leurs interrelations (proie-prédateur), les effets sur les différentes populations exposées. Or, face à la diversité et à la complexité des écosystèmes concernés, les connaissances nécessaires à l'approche écotoxicologique restent très insuffisantes.



Les principaux modes de diffusion des nanoparticules dans l'environnement.

Source : Débat public, 2009

Tendances d'évolution de la variable

Afin que les effets sur les écosystèmes puissent être compris ou prévus, il est donc non seulement nécessaire d'évaluer la prédictibilité des méthodes écotoxicologiques, mais aussi d'acquérir une connaissance approfondie des modifications physico-chimiques subies par les nanos dans l'environnement. Le cycle de vie des nanoparticules, depuis leur production jusqu'à leur utilisation et leur fin de vie, reste à ce jour une inconnue et donc un enjeu de santé publique et environnementale (OECD, 2013). Ainsi, plusieurs articles de synthèse ont mis en évidence la façon dont des facteurs environnementaux tels que la concentration de calcium, le pH ou les effets de ligands organiques vont modifier le comportement des nanomatériaux colloïdes et influencer leurs effets biologiques.

La tendance qui, à ce jour, semble la plus vraisemblable est une augmentation du décalage entre le nombre de NM développés et la caractérisation du risque écotoxicologique (plus que pour la santé humaine car les effectifs de recherche et les budgets associés sont inférieurs), associée à :

- l'inadéquation de certains de nos modèles écotoxicologiques face à la problématique des particules nanostructurées initiales et aux dégradations qu'elles subissent dans l'environnement qui aggravent ou minorent les effets biologiques de la particule initiale ;
- la possibilité de brusques changements d'échelle dans les interactions des NP avec les systèmes biologiques.

Prospective

Quels sont les déterminants de l'évolution future de la variable ?

Pour résumer et afin de pouvoir réaliser des évaluations quantitatives des risques, les défis de la recherche en nano sécurité environnementale comprennent (Klaine, 2012) : (1) la détection et quantification de ces matériaux dans des matrices biologiques et environnementales, (2) la capacité de prédiction de leur devenir dans l'environnement, (3) l'évaluation du risque (écotoxicité x valeur des contaminations incluant des connaissances sur les effets toxiques du nano de départ, du nano altéré par le séjour dans l'environnement et de plusieurs nanos, altérés ou non, agissant en synergie).

Ce qui suppose de :

- développer et valider des protocoles d'évaluation des contaminations environnementale ;
- développer et valider des méthodes d'essais évaluant l'écotoxicité des NP durant tout leur cycle de vie ;
- développer et valider des modèles permettant de prédire l'impact potentiel des NP sur les écosystèmes.

Quelles sont les incertitudes majeures relatives à la construction des hypothèses ?

- Incertitude 1 : est liée au fait que les risques associés aux exposition aux nanomatériaux ne seront déterminés qu'en fonction de nos connaissances sur le devenir des nanomatériaux ou des matériaux en contenant, c'est-à-dire le transport, l'altération et la transformation des nanomatériaux dans les écosystèmes.
- Incertitude 2 : concerne l'évolution de la prédictivité des outils relatifs à l'évaluation des dangers (écotoxicologie) et des expositions (mesure) des nanomatériaux d'origine et transformés.
- Incertitude 3 : concerne l'état des recherches sur (1) des NM *safe by design* et (2) l'optimisation des procédés et innovations technologiques via les nanotechnologies.

Hypothèses

Hypothèse 1. Risques écosanitaires graves (anticipés ou constatés)

Certains nanomatériaux dont les forts potentiels de danger auront été sous-évalués ou ignorés induisent au terme de plusieurs années la survenue d'effets environnementaux graves (dissémination globale ou relargage accidentel plus ou moins massif). Cette hypothèse est associée soit à :

- **une faible prédictivité** des outils relatifs à l'évaluation des dangers et des contaminations (mesure). D'une façon générale, l'écart de connaissances entre le progrès technologique et l'état de la recherche en nanosécurité, actuellement estimé à 10-20 ans pour la santé humaine et a minima supérieur pour les risques environnementaux, ne se réduit pas. Les recherches visent essentiellement à développer de nouvelles nanoparticules et nanotechnologies, alors que les moyens alloués aux recherches sur leurs effets potentiels sont insuffisants (tous secteurs confondus, public ou privé). Des conséquences néfastes sont à attendre entre le moment de la dissémination de certains nanomatériaux et la décision réglementaire d'interdiction d'utilisation ;
- **une bonne prédictivité** des outils relatifs à l'évaluation des dangers et des contaminations. En dépit d'une évaluation des risques à long terme qui aura prévu des effets environnementaux graves pour une proportion significative des nanomatériaux (voire tous les NM indistinctement = risque systémique lié aux caractéristiques dimensionnelles), l'absence de décision politique, dont une des causes pourrait être la crainte d'un fort impact économique en cas d'interdiction d'utilisation, entraîne la survenue d'effets environnementaux graves.

Hypothèse 2. Risques écosanitaires limités grâce à une gestion du risque responsable

Les risques écosanitaires sont limités grâce à une gestion du risque responsable reposant sur une bonne prédictivité des outils relatifs à l'évaluation des dangers (santé) et des expositions (mesure).

Malgré une dissémination globale des NM en termes de produits industriels, ils ne représentent pas un risque global pour l'environnement spécifiquement plus élevé par rapport aux autres agents chimiques : chaque NM se place entre les intervalles d'un continuum d'effets anticipés par la recherche en écotoxicologie, du plus grave au plus « anodin ». La connaissance des risques environnementaux, évaluée *a priori* (avant commercialisation) permettra d'autoriser ou non la dissémination des nanomatériaux, au cas par cas, en fonction du résultat de l'évaluation initiale du danger : en cas d'absence de risque attendu ou si le bénéfice potentiel « efface » le risque attendu (par exemple purification des eaux, réhabilitation des sols...). Si les outils d'évaluation *a priori* du danger sont prédictifs, la survenue de conséquences néfastes sera limitée.

Hypothèse 3. Risques écosanitaires limités par une conception sûre (*safe by design*)

Élaboration de NM *safe by design* : par exemple des NM stables relativement à leur utilisation (humaine) mais se dégradant ou s'inactivant très vite dans les conditions

environnementales. Cette possibilité est conditionnée par la connaissance des conditions physico-chimiques d'exposition des NM au cours de leur cycle de vie après utilisation humaine.

Hypothèse 4. Nanomatériaux, solution pour l'amélioration de la qualité de l'environnement

Optimisation des procédés et innovations technologiques via les nanotechnologies. Les avantages de l'utilisation des NM compensent largement leur écotoxicité propre : par exemple, apparition de technologies propres, sobres et économes permettant des économies de fluides et de matières à la source et limitant la production de déchets dangereux ; les innovations technologiques peuvent concerner des secteurs comme la purification des eaux, la réhabilitation des sols...

Références

- Bilan 2013 sur les substances à l'état nanoparticulaire produites, importées et distribuées en France en 2012. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Bilan-de-la-premiere-annee-de.html>
- Débat public 2009. Développement et régulation des nanotechnologies. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, dossier de présentation du débat, partie 3, 50-79.
- Gao J, Bonzongo JC, Bitton G et al. Nanowastes and the environment: using mercury as an exemple pollutant to assess the environmental fate of chemicals adsorbed onto manufactured nanomaterials. *Environmental Toxicology and Chemistry* 2008; 27: 808–810.
- Kahru A, Dubourguier HC. From ecotoxicology to nanoecotoxicology. *Toxicology* 2010; 269(2-3): 105-119.
- Klaine SJ, Koelmans AA, Horne N et al. Paradigms to assess the environmental impact of manufactured nanomaterials. *Environ Toxicol Chem.* 2012;31(1): 3-14.
- Nowack B, Ranville JF, Diamond S et al. Potential scenarios for nanomaterial release and subsequent alteration in the environment. *Environ Toxicol Chem.* 2012; 31(1): 50-59.
- OECD (2013). Environmentally sustainable use of manufactured nanomaterials. Workshop held on 14 September 2011 in Rome, Italy. Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials No. 39. ENV/JM/MONO (2013) 17.
- Park S, Woodhall J, Ma G et al. Regulatory ecotoxicity testing of engineered nanoparticles: are the results relevant to the natural environment? *Nanotoxicology.* 2014; 8(5): 583-592.
- Siddiq A, Sabir S, Tajammul Hussain S, Muhammad B. Highly active mesoporous SiO₂ TiO₂ based nanocomposites for photocatalytic degradation of textile dyes and phenol. *European Journal of Chemistry* 2013; 4: 388-395.
- Truhaut R. Eco-toxicology : objectives, principles and perspectives. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 1977 ; 1 : 151–173.

La maîtrise des risques

Jean-Raymond Fontaine, INRS

Définition

Cette variable désigne les méthodes de maîtrise de la contamination de l'environnement du procédé. Il peut s'agir de protéger :

- le procédé d'une contamination extérieure pour assurer la qualité du procédé et des produits fabriqués ;
- le salarié de produits dangereux émis par le procédé ;
- l'environnement de produits dangereux issus du procédé.

Les trois fonctions sont considérées simultanément car elles correspondent en général aux spécifications requises pour l'environnement d'un procédé. Elles sont souvent assurées par un seul système (complexe), de traitement de l'air par exemple.

Les équipements de protection individuelle font partie du champ de la variable.

Indicateurs pertinents

1. Existence de normes spécifiques aux nanomatériaux ou de méthodes d'évaluation concernant les équipements de protection individuelle et collective.
2. Marché, nombre d'installations de type nano réalisées en France.

À titre indicatif, la filière ventilation et traitement de l'air est représentée en Europe par l'organisation professionnelle Eurovent qui comprend plus de 1 000 sociétés dans 13 pays européens et emploie environ 150 000 personnes pour un chiffre d'affaires de plus de 20 milliards d'euros.

Rétrospective

Le développement de la technologie des salles propres résulte d'une convergence de besoins issus des applications militaires, de l'industrie manufacturière et du secteur de la santé.

Le besoin de réaliser des objets miniaturisés complexes et extrêmement fiables (gyroscope, radar, radio...) est apparu durant la Seconde Guerre mondiale. En particulier la réalisation de roulements miniaturisés de haute précision s'est heurtée à la présence de poussières et d'aérosols dans les ateliers. Dans les années cinquante apparaissent aux États-Unis les premières lignes de production de micromécanique maintenues dans des ambiances à empoussièremement contrôlé ; les premiers concepts de base s'y trouvent : air filtré, locaux en surpression, blouses, bonnets et sur chaussures pour les ouvriers...

Parallèlement les Britanniques du National Institute for Medical Research ont mis au point un flux laminaire artisanal pour réduire les infections dans les salles d'opérations.

Une autre contribution importante a été réalisée par les laboratoires d'AT & T lors de la mise au point du câble de téléphone transatlantique. Pour combattre l'atténuation du signal ils durent développer des répéteurs basés sur des tubes électroniques : 51 répéteurs et 306 tubes furent nécessaires. Le taux de panne toléré était d'une panne sur les 306 tubes sur 20 ans ! Ces tubes furent manufacturés par des ouvriers équipés de tenues vestimentaires pour éviter la génération de poussière dans des salles alimentées en air propre conditionné.

Les filtres à haute efficacité (HEPA) apparurent durant la Seconde Guerre mondiale (protéger l'air de locaux au front) mais surtout après la guerre avec le projet Manhattan pour protéger les chercheurs et techniciens impliqués dans le développement de la bombe. Ces filtres utilisaient des papiers amiantés puis des papiers à fibres de verre. Pour plus de fiabilité les militaires mirent au point des normes et méthodes de tests dans le début des années 1960. Ces méthodes de tests rigoureuses permirent l'amélioration des performances et la mise au point des filtres ULPA.

Un groupe de recherche du Sandia National Laboratories à Albuquerque conduit par Willis Whitfield fut chargé de développer une méthode pour maintenir des niveaux de propreté jamais égalés dans les lignes de production des armes nucléaires. Et c'est ainsi que fut rajouté le concept de flux laminaire qui résolut en 1961 le problème des salles propres. L'équipe développa une salle de 2,5 m x 3 m ; l'air filtré par HEPA pénétrait dans la pièce à partir du plafond et s'évacuait par le sol ; les parois du local étaient en métal. Le niveau d'empoussièremement était de 1 000 fois inférieur à ce qui se faisait auparavant.

Un standard fédéral fut développé en 1963 avec des militaires et sous-traitants pour uniformiser les méthodes de conception, de construction et de tests des salles propres. La norme FS209 qui sert à classer la propreté des salles en fonction de leur taux d'empoussièremement permit une large diffusion des savoir-faire dans tous les secteurs industriels mondiaux. Elle eut des répercussions dans des secteurs inattendus et ainsi Chrysler en adoptant la technique des salles propres dans une de ses usines de fabrication de transmissions put fournir pour la première fois une garantie de 80 000 km sur ses transmissions.

Prospective

Le bref historique de développement des salles propres est basé sur une publication de Daniel Holbrook de 2009. Il montre la rapidité de mise au point de la technologie innovante des environnements à empoussièremment contrôlé ainsi que les répercussions industrielles et militaires énormes qui en découlèrent. Cette révolution technologique s'est mise en place en l'espace d'une quinzaine d'année (de l'après-guerre jusqu'aux années soixante). Bien entendu les enjeux militaires de la guerre froide et les besoins industriels liés furent un moteur de développement sans égal.

Il n'est cependant pas illusoire de faire un parallèle avec le potentiel et les enjeux actuels des nanotechnologies et d'imaginer dans une hypothèse favorable (H1) que des développements similaires pourraient être réalisés en matière de maîtrise des procédés et des environnements de développement des nanomatériaux sur la prochaine quinzaine d'années. Pour illustrer cette hypothèse, nous transposons dans ce qui suit les enseignements les plus importants issus de l'historique qui précède.

- Le développement des nanotechnologies dans les secteurs industriels, militaire et médicaux nécessite un contrôle renforcé des procédés et de leur environnement tant pour des raisons de qualité et de fiabilité que pour des raisons de sécurité du personnel.
- Des nouveaux concepts de dispositifs aérauliques sont développés pour atteindre de nouveaux de niveaux de propreté jamais égalés jusqu'à présent.
- Ces nouvelles classes de propreté sont définies à partir d'instruments de mesure plus précis et adaptés aux nanomatériaux.
- De nouvelles normes permettent de codifier ces environnements et ces équipements de mesure ; elles contribuent à la dissémination des savoir-faire et des technologies.
- Les applications industrielles classiques en bénéficient et il en résulte un accroissement de la fiabilité des processus, des matériels et des produits fabriqués.
- Les problèmes de santé et de sécurité au travail sont maîtrisés grâce au recours à la robotique et aux retombées de la maîtrise de la contamination des environnements de process.

Des verrous technologiques peuvent néanmoins exister. Par exemple les nanoparticules ont des propriétés physiques particulières qui accroissent d'autant leur faculté à se déposer sur des parois qu'elles ont un diamètre réduit. Leur mise en œuvre peut alors générer de sérieux problèmes de contamination/décontamination des surfaces.

Lorsqu'elles sont émises à des concentrations importantes (à la sortie d'un procédé de fabrication par exemple), les nanoparticules peuvent s'agglomérer entre elles pour former des structures complexes de type fractal ou se déposer sur des particules microniques. Elles acquièrent dans ce cas le comportement dynamique de particules microniques ce qui complique les méthodes de détection ou de captage.

On peut donc envisager dans une hypothèse moins favorable (H2) que certains nano-aérosols apparaissant au cours des procédés de fabrication de nanomatériaux particuliers sont très toxiques avec des VLEP (valeur limite d'exposition professionnelle) très faibles. Les moyens de prévention collective et individuelle à mettre en œuvre doivent avoir des performances nettement supérieures à ce qui est connu jusqu'à présent.

Les procédés de fabrication doivent être réalisés dans des conditions de confinement de type nucléaire. Des filières spécifiques se mettent en place et l'essaimage au niveau industriel est très limité.

Il est vraisemblable que les deux hypothèses puissent coexister en fonction des types de nanotechnologies ou nanomatériaux considérés.

Hypothèses

Hypothèse 1. Maîtrise des risques dans tous les secteurs

La maîtrise des risques s'effectue dans tous les secteurs grâce au développement et à l'optimisation des équipements de prévention (confinement, ventilation, filtration, protection individuelle...). La prévention technique se développe de façon à limiter les expositions au regard de la dangerosité intrinsèque des nanomatériaux.

Hypothèse 2. Maîtrise des risques seulement dans quelques secteurs

Certains nanomatériaux nécessitent la mise en place de moyens de prévention contraignants et coûteux. La prévention technique ne permet pas d'atteindre des niveaux d'exposition suffisamment faibles au regard de la dangerosité de certains nanomatériaux. La maîtrise de risques est insuffisante dans de nombreuses entreprises.

Références

- Holbrook D., Controlling contamination : the origins of clean room technology, *History and Technology*, vol 25, 3, pp 173-191 (2009).
- Kasper G., Nanoparticle related issues in ventilated environments, in 'Ventilation 2012' the 10th international Conference on Industrial Ventilation, Paris 2012.
- Morose G., The 5 principles of 'Design for Safer Nanotechnology', *Journal of cleaner Production*, 18, pp 285-289, (2010).
- O'Shaughnessy P. T., Occupational health risk to nanoparticle exposure, *Environ. Sci. : Processes Impacts*, 15, pp 49- 61, (2013).

Le cycle de vie et la gestion des déchets

Jean-Raymond Fontaine, INRS

Définition

Cette fiche traite de la gestion des déchets issus de produits contenant des nanomatériaux durant tout le cycle de vie en vue de réduire la contamination des lieux de travail et de l'environnement.

Indicateurs pertinents

1. Évaluation du volume de déchets de nanomatériaux produit annuellement.
2. Réglementation, normes relatives à la gestion des déchets contenant des nanomatériaux.

Rétrospective

État des lieux

Il n'y a pas de réglementation spécifique concernant les déchets contenant des nanomatériaux. En particulier, le fait de contenir des nanomatériaux ne suffit pas pour classer un déchet comme dangereux.

Il n'existe donc aucune filière organisée pour collecter et traiter ces déchets.

La directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux déchets définit une hiérarchie dans la gestion des déchets : prévention du déchet, préparation en vue du réemploi, recyclage, autre valorisation notamment valorisation énergétique et élimination. Elle s'applique bien évidemment aux déchets contenant des nanomatériaux.

Tri des déchets

Le tri des déchets contenant des nanomatériaux est laissé à la discrétion des utilisateurs (laboratoire, industrie, particulier). Une étude de l'Observatoire régional des déchets industriels en Midi-Pyrénées a montré que certains laboratoires ou industriels ont mis en place une gestion de ces déchets basée sur un conditionnement spécifique du produit, un étiquetage des emballages et une collecte de type déchets dangereux.

Beaucoup de nanomatériaux issus d'un usage domestique (produits alimentaires, emballages, cosmétiques, médicaments...) suivent le cheminement des ordures ménagères.

Pollution de l'air : travaux de recherche

L'Ineris coordonne pour une durée de trois ans le projet NANOFlueGas, cofinancé par l'Ademe, qui a pour objectif d'évaluer les risques liés à l'incinération des nanomatériaux et de proposer des améliorations pour les procédés d'incinération et de traitement des effluents. Le projet cherche à mieux comprendre les mécanismes d'émission éventuelle de nanomatériaux lors de la combustion et doit évaluer, au travers d'un prototype expérimental, la faisabilité et l'efficacité de procédés d'incinération et de traitement des effluents pour les nano-déchets.

Le projet INNANODEP : financé par l'Ademe, ce projet est mené par le LNE en partenariat avec le centre commun Armines (Centre des matériaux de grande diffusion (CMGD) / Écoles des mines d'Alès) et avec la collaboration des industriels Arkema, Nanoledge et Plasticseurope. Il envisage d'évaluer l'efficacité des filières d'incinération pour traiter les déchets contenant des nanomatériaux manufacturés. Le travail effectué consistera à déterminer l'impact de l'incinération des nanocomposites à matrice polymère sur la composition et la microstructure des particules ultrafines présentes dans les aérosols produits, afin de déterminer si les moyens de traitement des fumées actuels des incinérateurs demeurent adaptés au traitement de ces nouveaux types de déchets.

Pollution de l'eau : travaux de recherche

Des nanomatériaux en suspension dans de l'eau ou d'autres liquides peuvent être rejetés dans l'environnement par un usage domestique, urbain ou industriel. Les nanomatériaux sont alors transportés vers des stations de traitement des eaux usées (STEP). Les boues issues du traitement des eaux dans les STEP sont généralement épandues sur les sols. Les STEP jouent donc un rôle important dans le contrôle de la dispersion des nanomatériaux dans l'environnement. Une étude prédit qu'en l'espace de quatre ans, les concentrations en nanomatériaux manufacturés dans des sols traités avec des boues de STEP aux États-Unis augmenteront d'un facteur 3.

Des questions se posent sur la nature des interactions entre les nanomatériaux arrivant dans une STEP et les communautés bactériennes constituant les boues activées, car de nombreux nanomatériaux possèdent des effets cytotoxiques vis-à-vis des bactéries. De tels effets réduiraient l'efficacité des traitements biologiques et le relargage potentiel de polluants dans l'environnement.

Les conclusions d'une expertise conduite aux Pays-Bas en 2011 sur le sujet sont intéressantes :

- il est plausible que des nanomatériaux soient rejetés dans l'air en aval des usines d'incinération ;
- pour les stations de traitement des eaux, il est probable que des nanomatériaux soient rejetés dans les eaux de surface. De plus, il y a un risque de contamination des stations d'épuration par des nanoparticules à effets cytotoxiques avec, comme conséquence, le rejet potentiel de polluants dans l'environnement.

Hypothèses

Hypothèse 1. Maîtrise des rejets des nanomatériaux dans l'air et dans l'eau

Des progrès en recherche / développement permettent d'assurer une maîtrise des rejets en nanomatériaux dans l'air et dans l'eau et une filière de traitement des déchets contenant des nanomatériaux se met en place dans différents secteurs industriels.

Hypothèse 2. Gestion des déchets maîtrisée dans certains secteurs seulement

Seuls certains secteurs industriels permettent une gestion maîtrisée des déchets. Le vieillissement des produits contenant des nanomatériaux génère un flux de nanoparticules tel qu'il n'est pas envisageable de prévenir la pollution de l'air et de l'eau (ruissellement sur le béton ou sur le verre par exemple).

Références

- Gardien Adeline. Déchets des nanotechnologies : De l'information à la gestion, rapport de l'Observatoire régional des déchets industriels de Midi-Pyrénées, Toulouse, 2010.
- Classification des déchets. Code de l'environnement, article R. 541-8.
- Nanomaterials in waste, The Hague: Health Council of The Netherlands, 2011; publication n° 2011/14E.
- Barton Lauren : A Framework for Predicting the Exposure of Inorganic Engineered Nanomaterials through Wastewater Treatment Plants and Land Application Units, thèse CEREGE, février 2014.

Les scénarios

Stéphane Binet, Nathalie Dedessus-Le Moustier, Aurélie Delemarle, Stéphanie Devel, Éric Drais, Jean-Raymond Fontaine, François de Jouvenel, Michaël Koller, Éric Gaffet, Irina Guseva Canu, Cécile Oillic-Tissier, Martine Reynier, Myriam Ricaud, Nathalie Thieriet, Olivier Witschger

Scénario 1. Un engagement fort et fructueux de l'État et des entreprises : un développement massif

Le nouveau moteur de la révolution technologique

Les années 2020 ont été marquées par une succession d'innovations scientifiques et techniques majeures dans différents domaines, qui ont eu pour effet de doper la recherche et la production et de redynamiser le tissu industriel, notamment français.

Au cours de cette période, les investissements publics et privés alloués à des technologies nouvelles et prometteuses se sont ainsi très fortement accrus. Leurs retombées ont contribué à une amélioration nette et durable de la situation économique qui a profité pleinement à l'industrie.

Parmi ces technologies innovantes, figuraient les nanotechnologies et les nanomatériaux identifiés, depuis quelques années déjà, comme des technologies clés génériques (aussi appelées *Key enabling technologies*, *KET*) c'est-à-dire des technologies indispensables au développement d'une vaste gamme d'applications à forte valeur ajoutée.

L'État, suivi de près par les entreprises françaises, a ainsi investi massivement dans la recherche et le développement de nanomatériaux et d'applications associées, levant rapidement la majorité des verrous technologiques et scientifiques. Les connaissances et le savoir-faire acquis ont permis d'atteindre aisément la mise en œuvre de la 4^{ème} génération de nanomatériaux (molécules à façon, systèmes évolutifs, etc.).

Un soutien appuyé a également été apporté, notamment par l'État, à la valorisation et au transfert des résultats de la recherche en favorisant les échanges, les passerelles et les liens entre l'industrie et le monde académique. Des laboratoires communs entre de grands organismes de recherche publics et certaines entreprises ont par exemple été créés.

Ces laboratoires disposent par ailleurs d'une main d'œuvre abondante et de haut niveau, bien que vieillissante. En effet, une politique publique forte a conduit de nombreuses universités et écoles à proposer des formations initiales et continues dédiées aux nanosciences et aux nanotechnologies. En parallèle, le nombre de bourses doctorales et

DU NANOBETON POUR PROTÉGER LA PLANÈTE *

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde. La fabrication du ciment – l'ingrédient principal du béton – serait responsable de 5 à 10 % des émissions de gaz carbonique causées par l'homme. En effet, les minéraux entrant dans la composition du ciment doivent être cuits (clinkerisés) à une température proche de 1 500 °C, ce qui en fait un procédé industriel particulièrement énergivore.

Le ciment, en réaction avec l'eau, crée le silicate de calcium hydraulique – la glu qui tient le mélange des agrégats, de la pierre et du sable. Et ce silicate de calcium hydraulique est justement un mystère pour les scientifiques, puisque ses propriétés, et par conséquent également celles du béton, semblent être liées à sa structure et plus précisément à sa nanostructure qui reste encore mal connue.

La recherche offre désormais de nouvelles techniques pour étudier et comprendre la structure étonnante du béton à l'échelle de la particule. Une équipe de chercheurs du MIT (Massachusetts Institute of Technology, États-Unis) a découvert que l'arrangement des particules nanométriques qui composent le ciment influe directement sur les propriétés mécaniques du béton, et donc sur sa résistance et sa stabilité. Il serait alors possible de changer la composition du ciment à condition de conserver le même arrangement de particules nanométriques, pour obtenir des propriétés différentes, voire améliorées. Une idée actuellement explorée est la substitution du calcium par du magnésium, la fabrication du ciment nécessiterait alors moins d'énergie.

L'addition d'autres objets nanométriques est également à l'étude, comme celle des nanotubes de carbone dans l'objectif de renforcer la résistance mécanique du béton, et – à terme – de réduire la quantité de béton utilisée.

Avec plusieurs milliards de tonnes de ciment produits dans le monde chaque année et des besoins en béton en augmentation constante, surtout dans les pays en voie de développement, les nanomatériaux semblent offrir des possibilités pour réduire les émissions de gaz carbonique et freiner le réchauffement climatique.

* Cet encadré, comme les suivants, a été écrit par Jan Irmer, journaliste.

post-doctorales consacrées à des travaux en lien avec les nanomatériaux a également été augmenté. Afin de promouvoir ces filières universitaires pointues et reconnues aux niveaux national et international, des actions de sensibilisation dès l'enseignement secondaire ont été mises en place.

Cette dynamique a conduit à la naissance d'une multitude d'entreprises innovantes (principalement des structures de faible taille ou de taille moyenne), grâce en partie à des subventions et commandes de l'État contribuant à transformer rapidement les découvertes en réussites industrielles, et donc en emplois et en croissance. De grandes entreprises, qui ont elles-mêmes déjà développé des applications de plus large diffusion, coexistent donc avec une myriade de plus petites structures.

Les nanomatériaux manufacturés sont donc, depuis une petite dizaine d'années, un des domaines d'excellence de la France, poussés par une implication forte de l'État. Les investissements publics mais également privés sont abondants, propices à une innovation ambitieuse. Les entreprises françaises disposent de surcroît d'une réelle capacité de réaction grâce à un savoir-faire acquis et maîtrisé depuis de nombreuses années. Aucune pénurie de matières premières et d'énergie n'a par ailleurs constitué un facteur limitant.

Le développement rapide des nanomatériaux fondé sur une succession rapprochée d'innovations technologiques clés, elles-mêmes issues de transferts technologiques en provenance du monde universitaire, s'est ainsi traduit par un retour de la prééminence des pays occidentaux, et notamment de la France, dans ce domaine très pointu au détriment des pays émergents. Seuls quelques nanomatériaux à très faible valeur ajoutée qui nécessitent peu de technicité et de savoir-faire sont produits dans les pays émergents, où la main d'œuvre demeure moins onéreuse.

Des applications multiples dans tous les secteurs industriels

Les industriels, tout comme les pouvoirs publics, ont très tôt compris en France et en Europe que, compte tenu de leurs propriétés bien souvent inédites, les nanomatériaux recèlent de potentialités très diverses et leurs utilisations ouvrent de multiples perspectives.

Les nanomatériaux ont ainsi rapidement été perçus comme un vecteur de croissance et d'emploi dans la majorité des secteurs industriels.

Ils ont concouru à la mise au point d'innovations incrémentales et de rupture dans les secteurs de l'agroalimentaire, de la construction, de la pharmacie, de l'électronique, de l'énergie, de l'environnement, du transport, de la cosmétique, du textile, de la défense, de la plasturgie et de l'emballage.

L'industrie chimique française, grâce à une maîtrise certaine des savoir-faire et des technologies de pointe, a pu répondre à cette demande pressante, ce qui a grandement contribué à sa prospérité.

Les nanomatériaux ont alors envahi la plupart des marchés, portés également par des coûts de développement et de fabrication demeurant abordables.

Des risques pour la santé et l'environnement maîtrisés

Les risques sanitaires et environnementaux associés aux nanomatériaux manufacturés mobilisent les pouvoirs publics depuis les années 2000. En effet, l'État, tout comme les industriels, ont très vite compris que cette question cruciale pourrait être un réel frein au développement des nanomatériaux manufacturés en France. Les financements consacrés aux recherches portant notamment sur la toxicité et l'écotoxicité des nanomatériaux manufacturés se sont donc fortement amplifiés au fil des décennies, grâce entre autres à la mise en place d'une taxe acquittée par les entreprises ayant une activité en lien avec des nanomatériaux qui alimente un fonds attribué à des laboratoires indépendants.

Les nombreux travaux de recherche alors entrepris ont démontré une bonne prédictivité des outils utilisés tant pour l'évaluation des dangers des nanomatériaux pour la santé humaine et l'environnement que pour la caractérisation des expositions de la population, de la faune et de la flore.

Les risques sanitaires et environnementaux sont donc évalués par les industriels *a priori* c'est-à-dire avant la commercialisation et au cas par cas ; les dangers tant pour la santé humaine que pour l'environnement étant très différents d'un nanomatériau à l'autre. Chaque nanomatériau se place ainsi dans un continuum d'effets anticipés par la recherche en toxicologie et écotoxicologie : du plus grave au plus « anodin ».

Cette connaissance *a priori* des risques pour la santé humaine et pour l'environnement permet aux industriels de commercialiser ou pas les nouveaux nanomatériaux en l'absence de risque attendu ou si le bénéfice espéré est supérieur au risque encouru.

Elle permet également aux entreprises de mettre en place, si nécessaire, une prévention des risques adaptée, afin de limiter l'exposition de leurs salariés. En effet, compte tenu de la multiplicité des applications des nanomatériaux manufacturés dans la plupart des secteurs industriels, la population salariée potentiellement exposée s'avère nombreuse (tout comme la population générale). La prévention s'effectue grâce à l'optimisation des équipements de prévention traditionnels (confinement, ventilation, filtration, protection individuelle, etc.) et demeure donc accessible à toutes les entreprises. Elle s'accompagne

également d'une maîtrise des rejets dans l'air et dans l'eau et d'une gestion des déchets *ad hoc* effectuée via une filière spécifique.

Les réglementations, notamment celles du travail, ont intégré quelques spécificités relatives aux nanomatériaux, telles que par exemple la métrique pertinente pour estimer les expositions de la population générale et salariée.

Des nouvelles technologies bien intégrées dans la société

Le développement accéléré des nanomatériaux n'a pas eu d'effet de repoussoir sur la société. Au contraire, un débat serein, après quelques débuts difficiles, s'est instauré entre la société, les experts, les scientifiques, le pouvoir politique et le monde industriel.

DES NANOMATÉRIAUX POUR NOURRIR LE MONDE

Pour nourrir une population qui ne cesse de croître avec une disponibilité de ressources naturelles de plus en plus critique, de nombreuses organisations internationales, notamment celles relevant des Nations unies, préconisent l'intensification durable comme avenir pour la production agricole mondiale.

L'utilisation de nanomatériaux dans les engrais et les pesticides est une des voies proposée pour parvenir à ce développement.

En effet, l'incorporation de nanomatériaux dans les fertilisants et les pesticides pourrait accroître considérablement leur efficacité, et par le même biais réduire les quantités nécessaires pour garantir des résultats optimaux. Si les engrais comptent pour 35 à 40 % de la productivité dans l'agriculture intensive et industrielle, une partie non négligeable se diffuse dans l'environnement, polluant les nappes phréatiques, notamment en nitrates et en phosphates, et créant une eutrophisation chronique qui cause des efflorescences algales capables de créer des zones mortes en asphyxiant la biosphère.

L'administration de nutriments sous forme de nanoparticules est également un axe de travail, puisque la taille des particules plus adaptée aux pores des plantes et racines rendrait leur assimilation plus aisée.

L'encapsulation d'engrais et de pesticides dans des nanostructures permettrait également d'en améliorer l'efficacité du fait qu'il serait alors possible de contrôler leur diffusion et leur libération graduelle dans les plantes en fonction des besoins, réduisant les quantités épandues sur les surfaces agricoles.

Néanmoins, si les nanomatériaux offrent de nombreuses possibilités pour une agriculture intensive à rendements élevés, à l'instar des organismes génétiquement modifiés (OGM), leur utilisation soulève de nombreuses incertitudes sur les conséquences à long terme. Et alors que le développement de ces nouveaux produits s'est accéléré, des études approfondies restent nécessaires pour s'assurer de l'innocuité de toutes ces innovations.

L'État français et la Commission européenne ont engagé, dans un contexte de croissance retrouvée, des actions de concertation, de dialogue et de négociation auprès de l'ensemble des parties prenantes, en organisant par exemple des consultations publiques.

Ces parties prenantes (syndicats patronaux et salariés, organisations non gouvernementales, associations citoyennes, etc.) ont par ailleurs participé activement, via notamment la publication d'une multitude de documents (articles de presse, sites internet, rapports de synthèse, ouvrages, etc.) et l'organisation de débats et de journées d'échanges, à un accroissement significatif de la diffusion de l'information et des connaissances aussi bien auprès du grand public que du monde du travail.

La société a ainsi réussi à intégrer aisément les mutations technologiques concourant au développement des nanomatériaux ainsi que les nanomatériaux eux-mêmes et les applications associées. Et ce d'autant plus que ces avancées ont été rapidement identifiées comme porteuses d'une amélioration et d'un enrichissement sensibles de la qualité de vie. Les nanomatériaux ont ainsi connu une progression régulière et concertée dans la société.

Scénario 2.

Un rejet éclairé de la part de la société : un développement dans quelques filières stratégiques

Un contexte politique et économique difficile

Le monde a été marqué depuis le milieu des années 2000 par une succession de crises économiques et politiques. Dans un contexte international et européen difficile, la situation financière et économique de la France s'est dégradée.

Faute de volonté et de moyens, le soutien politique au développement des nanomatériaux a été très limité. Les initiatives publiques n'ont concerné que quelques rares secteurs jugés stratégiques. Les entreprises se sont également heurtées à de grandes difficultés financières limitant fortement leurs efforts en recherche et développement. Par ailleurs, en raison d'une concurrence accrue des pays émergents, les délocalisations se sont accentuées et ont même concerné certains secteurs d'activité jusqu'alors épargnés tels que les industries du luxe. De nombreuses petites structures n'ont pas survécu.

Dans ce contexte très morose, les acteurs publics et privés n'ont pas réussi à s'entendre et à s'organiser collectivement pour réagir et rebondir. Il en résulte une très grande fragmentation de la gouvernance. Les marchés sont globalement peu structurés, mal organisés, ce qui impacte la rentabilité des quelques rares secteurs d'activité concernés par les nanomatériaux manufacturés.

Une remise en cause du modèle de développement

La débâcle économique s'est accompagnée d'une remise en cause profonde par la société du modèle de développement économique et politique, marquée par une nette méfiance vis-à-vis de la nouveauté. Le débat social s'est ainsi bloqué notamment au sujet des technologies nouvelles.

Plusieurs crises (scandale alimentaire, mise sur le marché de médicaments aux effets secondaires graves, explosion d'une usine chimique, atteintes à la vie privée, etc.) ont induit une perte de confiance envers les pouvoirs publics et le monde industriel. Certaines entreprises, notamment chimiques, pharmaceutiques et agroalimentaires, disposent d'une image fortement dépréciée dans la société. En outre, la conscience environnementale et les préoccupations associées n'ont jamais été aussi fortes dans la population.

La société civile se mobilise activement contre toute découverte jugée suspecte via des associations citoyennes, des syndicats salariés et des organisations non gouvernementales aux niveaux national et international. Chaque nouvelle technologie suscite systématiquement de la suspicion et est soigneusement jaugée. Elle fait ensuite l'objet d'une communication intense à destination du grand public mais également du monde du travail. L'influence développée par les représentants des entreprises industrielles et des groupes financiers s'est grandement amoindrie au fil des années, au profit de la société civile qui est de plus en plus écoutée et suivie par les décideurs politiques.

Cette méfiance vis-à-vis de l'innovation a bien entendu eu une forte influence sur le développement des nanomatériaux et des applications associées. Et ce d'autant plus que les études menées par la communauté scientifique depuis le milieu des années

PAS DE NANOMATERIAUX DANS MON ASSIETTE ?

L'utilisation de nanomatériaux dans l'alimentation soulève une question fondamentale de définition du terme. En effet, de nombreuses denrées alimentaires contiennent déjà naturellement des particules de taille nanométrique, comme le lait qui est, de façon schématique, une suspension de nanoparticules protéiques dans de l'eau. De même, des procédés traditionnels de transformation alimentaires impliquent également la création de nanostructures, tels que la production de ricotta ou de mayonnaise.

Un des principaux objectifs de l'utilisation des nanotechnologies et des nanomatériaux actuellement dans l'alimentation est le contrôle de la composition et de la structure des produits (amélioration des qualités nutritionnelles, modification des saveurs, etc.). Ainsi, des nutriments sous forme de particules nanométriques ajoutés aux denrées alimentaires pourraient être plus facilement assimilables par l'organisme. De même, la modification structurelle de produits alimentaires permettrait de faire appel à de plus petites quantités de composants fréquemment proscrits, comme le sel ou le gras, tout en préservant leurs qualités gustatives.

Alors que ces possibilités d'innovation semblent attirantes, peu de publicité est faite autour du sujet. La presse fait peu écho de ce type de visées, et pratiquement aucune entreprise agroalimentaire ne communique au sujet de recherches faites dans ce domaine.

Si l'industrie agroalimentaire est traditionnellement conservatrice, ce silence est essentiellement dû au traumatisme de l'introduction des OGM (organismes génétiquement modifiés) dans l'alimentation au milieu des années 1990 qui s'est soldée en Europe par une forte défiance de la société, mettant pour l'instant un coup d'arrêt à leur essor. Le tollé de craintes et le rejet soulevé par les OGM est en effet ce que les partisans des nanomatériaux dans l'alimentation cherchent à tout prix à éviter. C'est ainsi que la recherche des entreprises dans ce domaine se déroule essentiellement dans le plus grand secret, à n'être dénoncée que par quelques organisations de défense des consommateurs.

1990 sur les dangers des nanomatériaux manufacturés pour l'Homme concordent et tendent à montrer que, même en l'absence d'effets sur la santé humaine objectivés, de nombreux nanomatériaux ont une propension à se diffuser dans l'ensemble de l'organisme et à s'y accumuler. De même, les données collectées sur la faune et la flore indiquent de possibles effets écotoxicologiques de plusieurs nanomatériaux manufacturés. Les financements accordés, notamment par les pouvoirs publics, à ces questions capitales demeurent insuffisants et de nombreuses lacunes persistent.

Dans ce contexte, les entreprises les plus en pointe dans la fabrication et l'utilisation de nanomatériaux continuent à appliquer les méthodes de protection les plus élevées possibles en matière de sécurité. Cette stratégie pourrait leur permettre de se prévaloir le cas échéant de leurs expériences pour influencer sur les travaux législatifs futurs aboutissant à l'adoption de règles spécifiques. Dans les autres entreprises, notamment les plus fragiles, la maîtrise de risques s'avère bien souvent sommaire.

L'État se voit donc contraint à une application stricte du principe de précaution, dans un contexte où le dialogue entre les différentes parties prenantes s'est rapidement avéré délicat et où la survenue d'effets sanitaires et environnementaux liés au développement des nanomatériaux ne peut être exclue. De nouvelles réglementations conduisant à une interdiction de la fabrication et de l'utilisation de certains nanomatériaux sont ainsi entrées en vigueur, ce qui a également contribué à limiter fortement le déploiement des nanomatériaux.

Une recherche et une production ciblées

Les budgets alloués par les pouvoirs publics et par les industriels à la recherche et à l'innovation en lien avec le développement des nanomatériaux manufacturés et leurs applications ont drastiquement chuté depuis une dizaine d'années compte tenu du contexte économique et social.

Dès lors, les technologies mises au point et les connaissances acquises ne permettent pas d'atteindre le développement de la 4^{ème} génération de nanomatériaux (molécules à façon), l'innovation s'est interrompue entre la 2^{ème} (médicaments vectorisés, capteurs, etc.) et la 3^{ème} génération (supra-molécules). De même, de nombreuses applications n'ont pu atteindre le stade de l'industrialisation. La pénurie croissante de matières premières et d'énergie, liée principalement aux difficultés rencontrées pour leur exploitation dans des pays où sévissent de graves crises politiques, a également concouru à freiner considérablement le développement des nanomatériaux manufacturés et de leurs applications.

Les quelques financements attribuables ont concerné des secteurs stratégiques considérés comme prioritaires tels que la défense, l'électronique, le transport, l'énergie et l'environnement. De grandes entreprises d'envergure internationale se sont rapidement mais discrètement positionnées sur ces domaines qui leur assurent globalement une bonne rentabilité. Une tendance à la sous-traitance à quelques TPE/PME est répandue mais toujours empreinte de discrétion. Ces petites entités industrielles peinent toutefois à survivre dans un contexte de concurrence exacerbée et compte tenu d'une latitude décisionnelle et financière limitée face aux grands donneurs d'ordre.

Des structures publiques, mais également privées, vouées à la valorisation des résultats de la recherche associée à ces seuls secteurs ont été mises en place. De même, malgré un contexte économique difficile et une population active vieillissante, les ressources dégagées par les écoles et les universités ont été suffisantes pour proposer des formations continues et professionnelles en nanotechnologies et nanomatériaux pointues mais ciblées uniquement sur ces quelques domaines stratégiques soigneusement identifiés.

L'industrie chimique française s'est adaptée à ce positionnement forcé et s'est spécialisée dans le développement et la fabrication de nanomatériaux manufacturés à façon, à forte valeur ajoutée et destinés exclusivement à ces rares marchés stratégiques. La production à très

DU TOUT PETIT FAIT DEVENIR GRAND

Des chercheurs de l'université de l'Arkansas à Little Rock ont découvert que certains nanomatériaux pourraient avoir un effet très surprenant sur les plantes, et donc à terme potentiellement sur l'agriculture en général.

Ils ont en effet montré que, exposés à des nanotubes de carbone, les semences de plantes de culture, telles que la tomate, exhibent un taux de germination plus élevé, ainsi qu'une croissance plus soutenue et amplifiée. Cette découverte pourrait mener au développement de plantes améliorées pour le secteur de l'énergie en tirant bénéfice de l'augmentation de la biomasse quand les plantes sont exposées à des nanomatériaux.

Il semblerait que ces nanotubes de carbone, longs et fins, renforcent l'absorption de l'eau, puisque les semences qui y sont exposées contiennent davantage d'humidité.

Si cette découverte semble être encourageante, l'utilisation de nanotubes de carbone suscite encore des interrogations. Les effets de ces nanomatériaux sur l'environnement, et leur répercussion sur les organismes et la chaîne alimentaire restent encore mal compris. Plusieurs études font état de résultats alarmants : certains nanotubes de carbone auraient les mêmes effets cancérigènes que l'amiante sur les poumons de souris.

Ces recherches montrent les nombreuses potentialités des nanomatériaux, ils mettent encore davantage en évidence le besoin d'études approfondies pour rendre compte des risques associés à l'exploitation de ces innovations.

grande échelle des nanomatériaux manufacturés dits « anciens », nécessitant davantage de main d'œuvre mais moins de technicité, se concentre, quant à elle, dans les pays émergents.

Des nanomatériaux confinés à quelques secteurs stratégiques

Le contexte économique mais surtout sociétal a conduit à réduire drastiquement le développement et les marchés des nanomatériaux manufacturés en France.

En effet, la risquophobie et la technophobie de la société ont contraint l'État mais surtout les industriels à n'investir que dans quelques pans de certains secteurs stratégiques où les débouchés ne sont, de surcroît, pas en contact direct avec la population.

Ainsi, l'utilisation de nanomatériaux manufacturés a complètement été abandonnée dans de nombreux domaines d'activité tels que l'agroalimentaire (y compris l'emballage), la cosmétique, la pharmacie et le textile.

Les secteurs de la défense, de l'électronique, de l'énergie, du transport et de l'environnement constituent les seules exceptions.

La sensibilité environnementale de la société s'étant fortement accrue ces dernières années en raison notamment de la poursuite du dérèglement climatique, les nanomatériaux manufacturés ont trouvé de nombreuses applications dans les secteurs de l'environnement et de l'énergie. Les nanomatériaux ont notamment contribué à séquestrer les gaz à effet de serre. Par contre, l'utilisation de nanomatériaux manufacturés pour la production d'eau ultra-pure à partir d'eau de mer ou pour le traitement des sols pollués n'a pas abouti, en raison de la défiance de la population. Dans le secteur de l'énergie, l'abandon progressif du nucléaire a permis d'accélérer le développement de nanomatériaux manufacturés destinés aux énergies alternatives et notamment au stockage de l'hydrogène et aux nouvelles générations de cellules photovoltaïques. Un effort financier a également été porté par les industriels sur la mise au point de matériaux isolants plus efficaces incorporant des nanomatériaux, afin de limiter la consommation énergétique des foyers.

La situation internationale tendue, qui a vu la pérennisation de conflits au niveau international, a grandement concouru au développement des nanomatériaux manufacturés dans le secteur de la défense, notamment dans la fabrication de robots et de drones.

Dans le domaine de l'électronique, la tendance est depuis de nombreuses années à la miniaturisation croissante des composants. La nanoélectronique a explosé en France depuis le début des années 2020, soutenue par des aides publiques européennes conséquentes. De nombreuses applications inédites et très innovantes ont ainsi vu le jour telles que des nanocapteurs permettant de contrôler la présence et le degré de biodégradation des pesticides, mais également des systèmes permettant la prévention des collisions automobiles, l'optimisation de la consommation de carburants, etc.

Les filières de l'automobile, de l'aérospatiale et du nautisme ont œuvré de concert afin de développer une myriade de nouvelles applications inédites incorporant des nanomatériaux dans l'objectif de proposer des moyens de transport toujours plus légers, moins énergivores et moins polluants.

LA NANO GUERRE POUR TOUS

L'armement a de tout temps été un des principaux moteurs de la recherche technologique, et naturellement les militaires s'intéressent de près à l'utilisation des nanotechnologies et des nanomatériaux. Si la plupart des innovations développées concernent l'équipement et le génie militaire, certaines peuvent être employées pour la conception de nouvelles armes, capables de tuer et de détruire.

Le département de la défense des États-Unis a démontré la faisabilité d'une nouvelle arme – des bombes puissantes et compactes qui utilisent des nanométaux tels que le nanoaluminium pour créer des explosifs chimiques à ultra-haute combustion, nettement plus puissants que les bombes conventionnelles.

Toutefois, l'importante puissance de ces explosifs se trouve dépassée encore par les « mini-bombes nucléaires », actuellement en développement aux États-Unis, en Russie et en Allemagne. Ces engins, dont la fabrication est liée aux progrès réalisés dans les nanotechnologies, pourraient battre en brèche tous les dispositifs supposés limiter la prolifération des armes de destruction massive dans le monde. Bien que d'une puissance pouvant atteindre l'équivalent de plusieurs centaines de tonnes d'explosifs brisants, la taille et le poids (moins de quelques kilogrammes) d'une telle bombe thermonucléaire restent ridicules. Ces engins ne contiendraient que peu, voire pas du tout de matière fissile, n'entraînant virtuellement pas de retombées radioactives – ce qui n'en ferait techniquement pas des armes de destruction massive. Leur miniaturisation les rendrait en revanche bien plus susceptible d'être effectivement utilisée.

Par ailleurs, si la nanomédecine peut acheminer des médicaments à des organes bien précis dans le corps humain, des bioterroristes pourraient, avec ces mêmes techniques, diffuser des substances hautement toxiques vers les organes les plus vulnérables de leurs adversaires.

Les nanotechnologies ouvrent ainsi peut-être la voie à une nouvelle dimension de potentielle malveillance destructive, bien au-delà de celle des armes de destruction massive détenues par des États nations, puisque cette puissance effroyable pourrait se retrouver entre les mains de groupuscules extrémistes.

Scénario 3. Une mainmise industrielle : un développement dans des secteurs porteurs

Un soutien industriel sans faille à des secteurs jugés porteurs

La période 2015-2030 a été marquée par le prolongement de la crise de 2007 : des périodes de croissance faible, voire nulle, ont alterné avec des périodes de récession. Si la volonté politique d'un maintien d'activités de recherche et de production innovantes en France a été clairement affichée, elle n'a pas été suivie de faits. En dépit de contraintes budgétaires fortes, quelques aides et plans de soutien publics réussis ont été consentis sans toutefois parvenir à assurer la continuité nécessaire au développement de projets ambitieux et novateurs. Les résultats n'ont pas été à la hauteur des ambitions ni des espérances, malgré quelques avancées probantes, contribuant à amenuiser encore davantage les contributions publiques.

Les budgets alloués à la recherche et au développement par l'État en France ont ainsi progressivement diminué, même dans le domaine des technologies nouvelles jusque là épargnées. L'initiative publique a très nettement marqué le pas. Elle a été relayée par l'initiative privée, mais seulement dans certains secteurs jugés porteurs.

Quelques entreprises d'envergure internationale, robustes et dynamiques, des secteurs de la pharmacie, de l'électronique, de l'énergie et du transport ont investi massivement mais de manière raisonnée et très ciblée dans la recherche et le développement de certains nanomatériaux manufacturés et de leurs applications associées. Ces industriels ont poussé les marchés à se structurer pour se développer et ils ont utilisé notamment la normalisation pour y parvenir. La normalisation s'est ainsi renforcée et est devenue un véritable outil stratégique permettant aux entreprises d'assurer leur compétitivité. Les États n'ont pas été moteurs dans cette dynamique, ils l'ont tout juste accompagnée.

Cette course à l'innovation radicale a permis aux industriels d'atteindre rapidement la production de la 4^{ème} génération de nanomatériaux (molécules à façon, systèmes évolutifs, etc.), et de développer des applications inédites. Néanmoins, quelques verrous scientifiques et technologiques demeurent encore présents compte tenu du positionnement très précis des financements accordés à l'innovation.

Les structures publiques dédiées à la valorisation des résultats de la recherche implantées sur le territoire national étant nombreuses mais peu efficaces, les entreprises ont créé des plateformes privées spécifiquement destinées au transfert de ces technologies et découvertes. Ces plateformes, pour la plupart transfrontalières, proposent des moyens humains et matériels mutualisés en vue d'accompagner le développement des entreprises. De même, des réseaux de compétence spécifiques animés par les industriels se sont mis en place à l'échelle internationale, les réseaux nationaux marquant le pas. En effet, la complexité de la chaîne de développement (recherche, réalisation, validation industrielle, etc.) a nécessité la mobilisation des investissements sur des réseaux transnationaux.

Afin de les aider dans cette quête perpétuelle vers l'innovation, les grandes entreprises ont accompagné, voire soutenu, la création d'une myriade de petites et moyennes structures, type *start-up*. Ces entités assurent généralement des missions de sous-traitance au profit des grands groupes mais développent également en interne quelques innovations porteuses destinées à des marchés à faible ou moyenne diffusion.

Dans ce contexte économique tendu avec un accroissement sensible du nombre de chômeurs, le système éducatif français, faute de moyens, n'est plus en mesure d'assurer une formation initiale satisfaisante dans tous les domaines. Néanmoins, avec l'aide appuyée de quelques industriels, la formation initiale mais également professionnelle en nanotechnologies et nanomatériaux est devenue un îlot d'excellence en France. Des cursus universitaires orientés vers certains secteurs sont pro-posés ainsi que de nombreuses bourses doctorales et post-doctorales à visées applicatives.

L'appauvrissement du débat public

Dans une société où l'individualisme a largement pris le pas sur l'initiative collective et dans un contexte marqué par un rôle de l'État strictement limité aux tâches régaliennes, le débat public s'est considérablement appauvri. Les échanges de la société civile à propos des orientations politiques et économiques se sont réduits. L'État a perdu une partie de sa légitimité depuis la survenue et la pérennisation de la crise de 2007. La dualité de la société s'est par ailleurs accentuée, avec une opposition forte entre une population active minoritaire, aisée et plutôt âgée et une autre population toujours plus nombreuse qui s'appauvrit et se précarise. Les enjeux sanitaires et environnementaux ne concernent que peu cette population qui subit pleinement les effets de la crise économique. La pression exercée par la société pour que soient anticipés d'éventuels risques pour la santé et l'environnement n'est donc que très modérée et ne concerne qu'une mince frange des citoyens.

À l'inverse, les groupes de pression représentant les intérêts des entreprises industrielles et des groupes financiers restent très mobilisés et organisés, ils accroissent sensiblement leur influence auprès de pouvoirs publics affaiblis. Le poids politique des groupes défendant des intérêts économiques dépasse ainsi de loin celui des quelques organisations non gouvernementales, associations citoyennes et syndicats

DIAMONDS ARE FOREVER

Une équipe de chercheurs des universités de Brême, en Allemagne, et de Stanford, aux États-Unis, ont publié, en mai 2014, les résultats de leurs travaux sur les propriétés bactéricides des nanodiamants d'une taille de seulement quelques nanomètres – une taille 200 fois plus petite qu'une bactérie.

Leur efficacité à tuer des spécimens des deux principales classes de bactéries pourrait donner lieu à des applications pratiques comme additifs dans des désinfectants ou pour le revêtement de surfaces, constituant une alternative novatrice aux nanoparticules d'argent et de cuivre, déjà largement utilisées, mais auxquelles certaines bactéries semblent développer une résistance.

Ces nanodiamants, formés parmi la suie lors de l'explosion de composés carboniques dans un environnement sous haute pression, ont été découverts par des scientifiques soviétiques dans les années 1960, mais leur utilisation en laboratoire n'a été rendue réellement possible que depuis quelques années.

Si la raison pour laquelle ces particules détruisent les bactéries de manière aussi performante et rapide reste encore inconnue, les chercheurs supposent que cette propriété est due aux groupes anhydrides d'acides présents sur la surface des nanodiamants. En revanche, il semblerait qu'en aucun cas, ils ne pourraient être utilisés en tant qu'antibiotiques, puisqu'ils perdent leur action au contact des liquides corporels. C'est en même temps ce qui induit, selon les chercheurs, leur innocuité pour les cellules humaines.

Un fabricant a déjà manifesté son intérêt pour les intégrer aux fluides de coupe afin d'éviter la formation de biofilms bactériens dans ses installations. Il reste néanmoins à démontrer si les nanoparticules peuvent être efficaces contre des colonies entières de bactéries.

Quant aux chercheurs, ils projettent désormais d'explorer l'incorporation de ces nanoparticules antibactériennes à des matériaux utilisés pour fabriquer des implants chirurgicaux.

Il reste à voir si, au niveau des coûts, ces nouveaux bactéricides peuvent également concurrencer les conventionnelles nanoparticules d'argent et de cuivre. En effet, si le prix de la matière première reste peu élevé, sa transformation demeure onéreuse. Une fabrication industrielle ferait sans doute baisser sensiblement les coûts.

UN NOIR SI PROFOND QU'IL EN DEVIENT PLAT

Le revêtement d'objets avec une couche de noir, si profond qu'ils en prennent l'apparence d'un trou plat, est potentiellement important pour le développement d'armes furtives. Il serait encore plus surprenant d'avoir des objets de la vie courante qui auraient l'air d'une tache noire.

Cette réalité vient de devenir plus probable, alors que des chercheurs britanniques ont développé un nouveau matériau nommé Vantablack. Il absorbe 99,965 % de la lumière, dépassant le record mondial jusqu'ici détenu par la NASA et sa matière Superblack. Son pouvoir d'absorption de la lumière efface toute apparence tridimensionnelle des objets qu'il recouvre – c'est tellement sombre que l'œil ne comprend pas ce qu'il est en train de regarder.

Vanta, c'est l'acronyme de "vertically aligned carbon nanotube alloys" (alliage de nanotubes de carbone verticalement alignés), et son principe de fonctionnement est en quelque sorte semblable à celui d'une chambre anéchoïque aux parois recouvertes de pointes de mousse – une forêt de nanotubes de carbone qui absorbent la lumière résiduelle que leurs voisins auraient pu réfléchir. La lumière se perd ainsi dans cette forêt et est transformée en chaleur.

L'application principale des matériaux absorbant la lumière se fait dans les appareils optiques, surtout dans les télescopes ultrasensibles où toute lumière réfléchie par les composants crée du bruit parasitant la résolution de l'image. Les couches de peinture noire conventionnellement utilisée n'absorbent pas la totalité de la lumière, et une pollution lumineuse reste toujours problématique pour ces appareils.

De plus, ce nouveau matériau conserve une bonne cohésion évitant ainsi un effritement qui rendait, dans le passé, les projets similaires peu viables quand les retombées de poussières causait un bruit de fond trop élevé. En outre, sa stabilité thermique et sa résistance structurelle font de lui un candidat approprié pour la construction de télescopes orbitaux.

Si son fabricant, la société Surrey NanoSystems, confirme que des applications militaires sont également à l'étude, le secret-défense lui interdit de communiquer à ce sujet.

Le prix n'a également pas été mentionné, mais il est très élevé. Il reste donc peu probable que le Vantablack se retrouve, dans un futur proche, utilisé pour des objets de la vie courante, aussi amusant que cela aurait pu être.

salariés encore actifs en France et en Europe.

Les entreprises ont ainsi à leur charge presque exclusive la communication relative aux nouveaux produits qu'ils développent et commercialisent tels que les nanomatériaux manufacturés et leurs applications, sans que soit recherchée une véritable diffusion des connaissances et organisé un échange, avec tout au plus comme retombée négative un éventuel scepticisme de la population.

Des risques pour la santé et l'environnement non évalués

Les risques sanitaires et environnementaux des nanomatériaux manufacturés mobilisent les scientifiques depuis le milieu des années 90. Néanmoins, le prolongement de la crise économique a conduit l'Europe et les États à limiter fortement dès 2009 leur implication dans le financement d'études et de projets de recherche portant sur ce sujet.

Les industriels se sont donc substitués, mais seulement partiellement, aux États en finançant certains pans de la recherche académique et en développant une recherche privée portant notamment sur le *safe by design* c'est-à-dire sur une conception sûre des nanomatériaux et de leurs applications.

Néanmoins, ces crédits alloués aux études portant sur les risques des nanomatériaux manufacturés sur la santé humaine et sur l'environnement sont insuffisants et l'écart de connaissances entre le progrès technologique et la recherche en nanosécurité ne cesse de croître. Les risques sanitaires et environnementaux demeurent *in fine* toujours difficilement évaluables.

Faute d'avancées scientifiques permettant d'établir la nature exacte des risques d'une exposition déterminée à chaque nanomatériau, le droit n'évolue que très marginalement en la matière. La dérégulation du marché du travail s'est fortement accentuée et le contrat individuel entre l'entreprise et le travailleur est devenue la règle. Dans ce contexte, les entreprises les plus prospères dans la fabrication et l'utilisation de

nanomatériaux, généralement les plus grosses, appliquent des méthodes de protection strictes et poussées en matière de sécurité, dans l'objectif notamment de préserver et de fidéliser une main d'œuvre qualifiée. Cette stratégie pourrait leur permettre de se prévaloir le cas échéant de leur expérience pour influencer sur les travaux législatifs futurs aboutissant à l'adoption de règles spécifiques. Dans les autres entreprises, notamment les plus petites, la maîtrise de risques s'avère bien souvent très incomplète.

Une majorité des secteurs d'activité a volontairement fait l'impasse sur les nanomatériaux

L'agroalimentaire, le textile ou l'emballage ont été confrontés à un marché intérieur atone et à une très forte concurrence des pays de l'Europe de l'Est et de l'Asie où la main d'œuvre a l'avantage d'être de plus en plus qualifiée et moins onéreuse. Les coûts de développement et de fabrication sont donc prohibitifs en France et ne peuvent être répercutés sur les prix de vente compte tenu du faible pouvoir d'achat d'une grande majorité de la population. Par conséquent, la mise en œuvre des nanomatériaux manufacturés dans l'agroalimentaire, le textile et l'emballage demeure très anecdotique.

Dans une société vieillissante où le jeunisme fait loi, la demande en cosmétiques et produits de soin est croissante. Néanmoins, dans le secteur de la cosmétique, les investissements en recherche et développement concernant l'utilisation de nanomatériaux manufacturés ont été très ciblés en raison d'un marché fortement limité par la crise économique. Quelques produits haut de gamme incorporant des nanomatériaux sont mis au point et commercialisés en quantité réduite pour une clientèle exigeante, généralement aisée et donc peu nombreuse.

Enfin, la situation internationale s'étant apaisée, seuls quelques conflits très locaux et d'intensité limitée subsistent, et compte tenu des budgets publics de plus en plus étriqués, l'utilisation de nanomatériaux manufacturés dans le secteur de la défense a considérablement été freinée.

Quelques rares secteurs porteurs dynamisés

Dans le secteur de la pharmacie et de la santé, la nanomédecine occupe une place de plus en plus prépondérante et incontournable en raison des effets positifs à long terme sur la santé et des coûts raisonnables. Les budgets alloués par les industriels à l'innovation en France n'ont cessé de croître. La recherche est ainsi très dynamique et fructueuse et le passage au stade industriel s'effectue aisément. L'industrie française s'avère très concurrentielle et compétitive au niveau international, la nanomédecine est devenue l'un des domaines d'excellence de la France. Les marchés extérieurs offrent par ailleurs de nombreuses perspectives alors même que le marché français affiche un net repli dû à une solvabilité diminuée.

Dans le domaine de l'électronique, la tendance est depuis de nombreuses années à la miniaturisation croissante des composants. La nanoélectronique s'est très vite imposée en France comme un secteur d'activité clé, soutenu par des efforts financiers importants consentis en Europe dans l'innovation par de grands groupes industriels et grâce à un accès sans contrainte aux métaux stratégiques dans le monde. Une multitude d'applications originales a ainsi été développée et commercialisée telles que des nanocapteurs garantissant le développement de souches de plantes résistantes aux conditions climatiques défavorables ou des équipements permettant le dépistage et le

UN NANO-RESEAU POUR LES DIABÉTIQUES

La nanomédecine est en plein essor. Et quel meilleur sujet de recherche qu'une maladie qui affecte les vies de plus de 356 millions de personnes à travers le monde, dont presque 3 millions en France, et dont le nombre de personnes atteintes est en constante augmentation : le diabète.

Les diabétiques, de type 1 comme de type 2, mènent un combat permanent pour faire face à la défaillance de leur corps relative à la fabrication de l'insuline, ou son incapacité de faire un usage efficace de l'insuline qu'il produit. Leur première contrainte quotidienne est de contrôler régulièrement leur niveau de glycémie, sous la menace de complications telles que des maladies cardiovasculaires et des dommages irréversibles de la rétine, des reins et du système nerveux.

Une équipe de l'université de North Carolina State tente de développer des systèmes qui pourraient permettre de pallier directement les pancréas défaillants. Le professeur Zhen Gu et ses collaborateurs utilisent les nanotechnologies dans l'objectif de créer un substitut artificiel aux cellules bêta dans les îlots de Langerhans du pancréas qui relâchent normalement de l'insuline pour contrer des niveaux de glycémie élevés.

Ils ont mis au point un réseau injectable de capteurs à l'échelle nanométrique. Des nanoparticules sont revêtues d'une pellicule dont la charge électrique, soit positive soit négative, leur permet de s'insérer dans un maillage de réseau une fois injectées sous la peau.

Quand la glycémie est élevée, ce réseau se dégraderait de façon à libérer de l'insuline. Le cœur de ce « nano-réseau » est formé par des nanoparticules de dextrane chargées d'insuline et d'enzymes spécifiques au glucose. Des niveaux de glucose élevés activent ces enzymes pour convertir le glucose en acide gluconique, décomposant le dextrane et libérant l'insuline pour contrôler la glycémie.

Un de ces réseaux aurait déjà maintenu pendant une dizaine de jours des niveaux de glycémie normaux chez une souris atteinte de diabète de type 1, comme l'a annoncé l'équipe, et des travaux seraient en cours pour le rendre biocompatible pour les humains et l'optimiser afin que sa vitesse de réponse corresponde aux cellules du pancréas. L'équipe du professeur Zhen Gu expérimente également l'utilisation d'ultrasons pour déclencher à distance la libération d'insuline par ce même réseau implanté.

Ces innovations pourraient non seulement affranchir les diabétiques de l'obligation de continuellement contrôler leur glycémie, mais surtout rendre ce processus plus précis tout en réduisant le besoin de régulièrement s'injecter de l'insuline.

diagnostic précoce de maladies rares, etc. La France figure parmi les leaders mondiaux de la nanoélectronique.

Le bâtiment et les travaux publics ont investi depuis le milieu des années 2000 dans la mise en œuvre de nouvelles applications innovantes incorporant des nanomatériaux assurant ainsi leur déploiement dans la plupart des et des infrastructures routières en vue par exemple d'améliorer la résistance des matériaux, l'isolation, la sécurité et les impacts environnementaux et énergétiques.

Dans le secteur de l'énergie, la hausse régulière des prix du gaz et de l'électricité ainsi que des matières premières a conduit les industriels à accroître sensiblement les crédits dédiés à la recherche dans l'objectif de développer des énergies renouvelables, grâce notamment à la mise en œuvre de nanomatériaux et de nanotechnologies.

Enfin, les filières de l'aéronautique et du nautisme ont mobilisé efficacement leurs efforts, y compris de manière transversale, depuis quelques années. Cette synergie a permis d'enrichir le savoir-faire français et de développer une palette d'innovations qui incorporent pour la plupart des nanomatériaux et nanotechnologies : diminution des rejets, augmentation de l'efficacité énergétique, etc.

L'industrie chimique française s'est organisée pour répondre au mieux aux besoins de ces secteurs porteurs et s'est spécialisée dans le développement et la fabrication de nano-matériaux manufacturés à façon. La production à très grande échelle des nanomatériaux manufacturés moins pointus, nécessitant davantage de main d'œuvre mais moins de technicité, se concentre, quant à elle, dans les pays émergents.

Scénario 4. Une volonté régionale soutenue : un développement en fonction des compétences locales

Une Europe des régions dynamique

Les années 2020 ont vu le retour d'une croissance économique significative dans les pays développés, notamment en Europe et en France. Cette embellie est due en grande partie à l'émergence, après de nombreuses années très délicates, d'une Europe forte tant politiquement qu'économiquement. Cette Europe se veut avant tout une Europe des régions, plus qu'une Europe des nations. Une baisse nette du chômage et une hausse de la consommation accompagnent ce retour de la croissance, notamment dans les régions les plus dynamiques. Le tissu industriel européen et français est globalement stimulé, la production relancée. La richesse et le niveau de vie de la société européenne ont augmenté très sensiblement alors même que des crises politiques perdurent en Afrique, en Asie et au Moyen-Orient.

Dans ce contexte économique, politique et social favorables, les régions les plus riches, pour certaines transfrontalières, ont investi massivement dans l'innovation et les technologies nouvelles et notamment dans le domaine des nanomatériaux manufacturés, en sollicitant des financements européens et en s'appuyant sur un tissu industriel local dynamique.

En fonction de la spécificité de ce tissu industriel local, bien souvent en adéquation avec la recherche académique déjà implantée, les financements sont portés sur des secteurs d'activité bien précis. Ces aides publiques européennes accordées au développement des nanomatériaux manufacturés et de leurs applications sont complétées par un effort financier soutenu consenti de la part des entreprises.

Afin d'encourager cette dynamique, l'Europe et les entreprises agissent de façon coordonnée au travers des structures de normalisation comme le CEN (Comité européen de normalisation). Ces entités, qui ont une légitimité de plus en plus reconnue, regroupent progressivement toute l'expertise nécessaire à l'élaboration de normes techniques, générales et sectorielles.

Une recherche orientée en fonction des compétences locales

L'essor des nanomatériaux manufacturés et des applications associées demeure néanmoins ralenti voire freiné en France, mais également dans d'autres pays européens, par l'absence d'une volonté politique nationale claire et affirmée sur ce sujet et par le manque de coordination associé.

Chaque région, même transfrontalière, se focalisant sur des secteurs et applications très ciblés, la mise en commun des connaissances, des expertises et du savoir-faire acquis est parfois laborieuse. Les échanges et collaborations se développent avec quelques difficultés, les travaux de recherche demeurent plutôt cloisonnés et les économies d'échelle sont souvent bien limitées.

Ainsi, malgré des découvertes nombreuses et probantes, qui n'ont pas été entravées par des contraintes majeures liées à la disponibilité de l'énergie et des matières premières, les avancées scientifiques et techniques ne permettent pas systématiquement aux

chercheurs d'atteindre le développement de la 4^{ème} génération de nanomatériaux (molécules à façon, systèmes évolutifs, etc.), l'innovation demeure, selon les disciplines, parfois bloquée entre la 2^{ème} (médicaments vectorisés, capteurs, etc.) et la 3^{ème} génération (supra-molécules).

Certains procédés et applications peinent, également, à franchir le stade du laboratoire pour atteindre celui du pilote ou industriel ; bien que de nombreuses structures publiques, mais également privées, implantées sur un territoire bien identifié et vouées exclusivement à la valorisation des résultats de la recherche associée à un secteur ciblé aient été mises en place. Des pôles de compétitivité, ainsi que des incubateurs, des pépinières et des technopoles axés sur le développement des nanomatériaux manufacturés et de leurs applications ont ainsi été créés sur l'ensemble du territoire. Les réseaux de compétences spécifiquement dédiés aux nanomatériaux qui existaient depuis 2004 en France, tels que C'Nano, ont disparu au profit de réseaux orientés sur un secteur d'activité donné et implantés localement.

Compte tenu de la multiplicité des secteurs d'application concernés, de nombreuses entreprises de faible ou de taille moyenne ont pu, grâce au soutien de l'Europe et des régions, investir le domaine. Elles coexistent avec de grandes entreprises d'envergure internationale déjà bien impliquées dans le développement et la production de nanomatériaux et des applications associées. Les plus petites structures assurent généralement des missions de sous-traitance au profit des grands groupes mais développent également en interne quelques innovations porteuses destinées à des marchés de faible ou moyenne diffusion.

La reprise économique a impliqué des besoins croissants en termes de formation initiale et continue, tant pour assurer l'employabilité d'une population autochtone active vieillissante que pour former une main d'œuvre immigrée nombreuse. Aidée par le secteur privé toujours en quête d'une main d'œuvre qualifiée et par les régions, une vaste offre de formation initiale et continue en nanotechnologies et nanomatériaux, axée pour la plupart sur des secteurs bien précis, est proposée par les universités et les écoles. Les régions attribuent également un nombre croissant de bourses doctorales et post-doctorales.

Des risques sanitaires et environnementaux graves mal anticipés

Les risques sanitaires et environnementaux des nanomatériaux manufacturés interpellent la société civile et les pouvoirs publics depuis le milieu des années 1990.

Néanmoins, les budgets alloués tant par l'Europe que les régions portent essentiellement sur le développement de nouveaux nanomatériaux et des applications associées au détriment des recherches portant sur leurs risques potentiels. Un écart important persiste donc entre les avancées technologiques associées aux nanomatériaux et leurs impacts éventuels sur la santé. Alors même que les outils disponibles tant pour l'évaluation des dangers des nanomatériaux pour la santé humaine et l'environnement que pour la caractérisation des expositions de la population, de la faune et de la flore ne démontrent qu'une faible prédictivité.

Malgré cette méconnaissance des risques et en l'absence de décision politique au niveau national, le développement, la production et la commercialisation de nanomatériaux manufacturés s'intensifient avec la possibilité que certains nanomatériaux dont les dangers potentiels auront été sous-évalués ou ignorés induisent dans les prochaines années la survenue d'effets sanitaires et environnementaux graves.

Dans ce contexte d'incertitude, les entreprises les plus florissantes dans la fabrication et l'utilisation de nanomatériaux mettent en place les méthodes de protection les plus élevées possibles en matière de sécurité, sans toutefois savoir si elles sont suffisantes. Dans les autres entreprises, notamment les plus petites, la maîtrise de risques s'avère bien souvent très lacunaire.

Une indifférence assumée de la société civile

La prospérité retrouvée et ses fruits partagés ont concouru à apaiser la population, notamment dans les régions les plus favorisées. La société a pourtant connu des mutations importantes liées au développement de nombreuses technologies nouvelles, parmi lesquelles les nanomatériaux manufacturés, mais elle les a intégrées sans difficulté notable. Et ce d'autant plus que ces avancées ont été rapidement identifiées comme porteuses d'une amélioration sensible de la qualité de vie.

Les débats à propos des orientations à prendre se sont considérablement réduits, les citoyens faisant pleinement confiance aux décisions émanant de l'Europe. La société civile déploie ainsi au fil des années une certaine passivité voire une indifférence revendiquée et assumée à l'égard des choix tant économiques que politiques, alors même que les sociétés occidentales apparaissent comme des havres de paix dans un monde chaotique marqué par plusieurs conflits qui s'enlisent.

Dans ce contexte, la pression exercée par la société pour que soient anticipés des éventuels risques pour la santé et l'environnement n'est que très modérée et ne concerne qu'une fraction minoritaire de la population. Quelques dialogues sont néanmoins proposés au niveau régional entre les différentes parties prenantes, mais la diffusion des connaissances et des informations relatives à

PLUS BLANC AU SOLEIL

Le dioxyde de titane est, depuis de nombreuses années, utilisé comme pigment, le fameux « blanc de titane », en vertu notamment de ses remarquables propriétés de réfraction de la lumière. Il est présent dans de nombreux produits de la vie quotidienne, depuis les lignes blanches sur les courts de tennis aux dentifrices et fromages industriels (additif E171).

Il est également utilisé, sous forme nanométrique, dans les crèmes solaires en tant qu'absorbeur des rayons ultraviolets. Il permet ainsi d'obtenir une crème très protectrice qui demeure néanmoins transparente en raison même de la taille des particules de dioxyde de titane.

Mais ce sont d'autres propriétés qui mettent le dioxyde de titane nanométrique en vedette dans des applications toujours plus nombreuses et prometteuses.

En effet, le dioxyde de titane nanométrique possède une activité photocatalytique, c'est-à-dire que sous l'effet de la lumière, il permet d'accélérer la décomposition de certaines matières organiques et inorganiques.

Le dioxyde de titane nanométrique est ainsi incorporé dans une multitude de matériaux qui acquièrent alors des propriétés autonettoyantes, dépolluantes et désinfectantes.

Des bâtiments et routes peuvent ainsi contribuer à dépolluer l'air, des emballages peuvent protéger chimiquement leur contenu, et on pourrait même imaginer un canapé dont le tissu imprégné se nettoierait au soleil.

Par ailleurs, une surface dotée d'un revêtement à base de dioxyde de titane nanométrique exposée à la radiation ultraviolette n'offre aucune retenue à l'eau de pluie, qui s'évacue donc plus facilement, propriété appelée « superhydrophile », renforçant l'effet autonettoyant, et donnant lieu par exemple au verre antibuée et antisalissures commercialisé depuis le début des années 2000.

D'autres utilisations sont également à l'étude, telles que l'emploi du dioxyde de titane nanométrique pour la production d'énergie photovoltaïque, et même pour le stockage électronique de données.

Néanmoins, des craintes existent au sujet de risques tant pour l'Homme que pour l'environnement associés à ce nanomatériau prometteur. Son écotoxicité reste mal connue, et la diffusion des nanoparticules dans l'environnement pourrait avoir des impacts néfastes sur les écosystèmes.

En attendant, le dioxyde de titane est l'un des nanomatériaux les plus produits et utilisés dans le monde, et il semble que cet essor tend à s'amplifier.

LA REVOLUTION DU GRAPHENE

Un matériau va révolutionner le monde : le graphène.

Ce matériau, une feuille de carbone pur, est si fin, de l'épaisseur d'une seule molécule de carbone, qu'un gramme suffirait à recouvrir une surface de la taille d'un terrain de foot. Il présente des propriétés qui le rendent 200 fois plus résistant que l'acier. Souple et transparent, il conduit l'électricité et la chaleur mieux que toute autre matière.

Ces propriétés hors pair font de lui un matériau de choix pour construire un monde technologique totalement novateur, avec des appareils flexibles, des vêtements électroniques ou des ordinateurs qui font directement interface avec les cellules du corps.

Alors qu'on théorisait depuis des décennies sur son existence, le graphène n'a été isolé pour la première fois qu'en 2004 par des chercheurs de l'université de Manchester, récompensés par la suite par le prix Nobel de physique en 2010. Et depuis ce matériau incomparable attire de plus en plus l'attention.

Ses applications semblent innombrables. Il permet la production d'appareils électroniques plus fins et plus rapides que ceux basés sur le silicium, avec l'avantage de les rendre transparents et flexibles. Des batteries à base de graphène sont à charge rapide et durable.

Le graphène ne se corrodant pas au contact de liquides, les équipements électroniques à base de graphène sont immersibles, au point que – grâce à leur petitesse – on peut envisager de les intégrer dans des systèmes biologiques, en d'autres mots de les implanter dans le corps au niveau cellulaire.

En avril 2014, Samsung, en Corée, a annoncé avoir développé des transistors faits de graphène sur un film de silicium, alors que des chercheurs de chez IBM, Nokia et SkanDisk ont utilisé le matériau pour créer des senseurs, des transistors et de la mémoire de sauvegarde.

Reste la question du coût de ce « Graal » de l'électronique. Alors qu'il n'y a que quelques années, on avançait que la production d'un mètre carré de graphène reviendrait à 600 milliards d'euros, et qu'en 2009, seulement deux sociétés étaient capables d'en produire, depuis, de nombreux projets ont vu le jour qui ont permis de diminuer drastiquement son coût de fabrication.

l'émergence de nouvelles technologies telles que les nanomatériaux reste limitée, faute de public intéressé.

Les groupes de pression représentant les intérêts des entreprises industrielles et des groupes financiers demeurent, néanmoins, très mobilisés et organisés. Ils accroissent très nettement leurs influences notamment auprès de l'Europe sur les questions réglementaires. Cette pression soutenue couplée à un État français de plus en plus déficient conduit à une réglementation européenne et française qui évolue peu.

Des pôles d'excellence en région

De nombreuses régions européennes, transfrontalières pour la plupart, ont investi dans des secteurs spécifiques considérés comme stratégiques ou porteurs, en fonction principalement du tissu économique local et des organismes de recherche publics déjà établis.

Des pôles d'excellence ont ainsi été créés dans toute l'Europe dans les domaines de l'électronique, de l'agro-alimentaire, de la pharmacie, de la cosmétique, du textile, de l'énergie, de l'emballage et de la plasturgie. L'utilisation des nanomatériaux manufacturés et des nanotechnologies ont très fortement contribué à l'image de réussite technologique de ces secteurs et donc à la richesse des régions associées.

Seuls quelques secteurs comme la défense demeurent à la main des États. Ce domaine a, par ailleurs, connu un

développement important en raison des affrontements qui persistent en Afrique, en Asie et au Moyen-Orient. Les nanomatériaux manufacturés ont ainsi grandement concouru à la fabrication de nouveaux robots et drones.

Dans ce contexte, l'industrie chimique française et européenne est restée compétitive et a développé de nombreuses innovations à façon destinées à chacun de ces secteurs.

Les impacts en santé et sécurité au travail en France dans les petites entreprises des scénarios et les conséquences sur le besoin en prévention

Agnès Aublet-Cuvelier, Stéphane Binet, Benoît Courrier, Stéphanie Devel, Michel Héry, Marc Malenfer, Michel Pourquet, Myriam Ricaud, Jérôme Triolet, INRS

Conséquences en santé et sécurité au travail du scénario 1

Dans un contexte de saut technologique majeur comme celui qui est décrit dans le scénario 1, on assiste à un développement accéléré de nombreux nouveaux nanomatériaux qui se double d'une progression de la capacité d'évaluation de leurs propriétés toxiques (comme de celle des agents chimiques en général). Les méthodes d'évaluation des risques bénéficient à la fois de ces avancées techniques et technologiques et de la dynamique financière correspondante. En d'autres termes, on dispose à la fois des outils et de l'argent pour innover, produire et prévenir les risques. Même si la connaissance de la toxicologie de certains nouveaux produits n'est pas toujours complète, l'utilisation de modèles de relations structure / activité élaborés permet le plus souvent de catégoriser correctement les nouveaux produits et de mettre en place un niveau de prévention des risques professionnels (et environnementaux) adapté. Ce dynamisme est accompagné efficacement par différents organismes spécialisés : réseau Prévention des risques professionnels de la Sécurité sociale, services de santé au travail, inspection du travail, ainsi que des structures inter-entreprises dédiées spécifiquement aux questions de prévention dans les plus petites entités. Il s'inscrit également dans un cadre particulièrement actif de négociations entre partenaires sociaux qui a abouti à la signature de nombreux accords de branche.

Les nombreuses PME/TPE actives dans le secteur des nanotechnologies (qu'elles les développent, les fabriquent ou les mettent en œuvre) bénéficient de ces avancées et de ce climat favorable. La maîtrise des procédés s'est améliorée en tirant bénéfice de l'ensemble des progrès technologiques. Cela vaut également pour des phases comme la maintenance ou le nettoyage et pour les opérations liées aux déchets (traitement, dépollution des installations ou des sites) pour lesquelles la connaissance des dangers, les progrès techniques et l'allègement de certaines contraintes économiques et temporelles permettent une mise en œuvre satisfaisante de mesures de prévention. Les équipements de protection collective et individuelle, nécessaires pour effectuer ces opérations spécialisées, ont connu des évolutions importantes au cours de la période considérée dans

l'exercice, notamment en termes de spécificité (le bon équipement pour la bonne nuisance), d'efficacité et de confort. En contrepartie de ce recours facilité aux équipements de protection, la prise en compte de la sujétion résiduelle qu'ils font encore peser sur l'utilisateur a progressé tant dans les entreprises que dans la réglementation, à travers des dispositions d'aménagement des méthodes et rythmes de travail.

Ce panorama favorable doit cependant être nuancé par le contexte particulier de développement des nanomatériaux, marqué par un fort dynamisme. L'apparition continue de nouveaux produits et la courte durée de « vie industrielle » de certains d'entre eux a pour effet d'obliger les entreprises à une adaptation permanente de leurs installations : le risque réside ainsi dans l'apparition d'un décalage même transitoire entre cette adaptation et les besoins réels intégrant la prise en compte de la santé et de la sécurité. La notion de fin de cycle technologique prend ici toute son importance : la production peut avoir amorcé une évolution importante correspondant à un nouveau cycle, sans que les moyens de prévention des risques professionnels aient intégré les évolutions nécessaires.

Le contexte est également favorable au foisonnement d'initiatives qui peuvent aller dans le sens d'un développement insuffisamment maîtrisé par l'entreprise dans certains cas : *start-up* mono-produit qui peine à trouver les moyens de son développement ultérieur, utilisation d'installations non parfaitement adaptées pour la production d'un nouveau produit au devenir encore incertain. La culture sécurité de l'entreprise peut avoir du mal à s'adapter à ces évolutions rapides. Et de la même façon, les structures internes chargées de la santé et de la sécurité peuvent alors ne pas suivre le rythme de l'évolution de l'entreprise. La mobilité des personnels changeant de structure, encouragée par le dynamisme de l'activité, peut constituer un obstacle à un suivi et à une traçabilité corrects de leurs expositions.

Grâce aux progrès effectués en toxicologie, et notamment à l'utilisation de modèles de relations structure/activité, le niveau de la prévention peut être adapté au risque : les nanomatériaux sont considérés soit comme des agents chimiques soit comme des agents chimiques dangereux. Cependant en liaison avec le dynamisme de l'activité évoqué précédemment, des circonstances dans lesquelles ces bonnes pratiques sont prises en défaut existent : par exemple, le développement ou la production de nouveaux nanomatériaux dans des installations de demi-gros dont les émissions sont insuffisamment captées ou l'utilisation de ces produits dans des formulations de base de l'industrie manufacturière (fabrication de résines ou de pré-compounds par exemple) dans des phases de pré-empâtage potentiellement très exposantes au niveau respiratoire. De la même façon, le développement exponentiel de la production et de l'utilisation de nanomatériaux a eu pour effet que ces produits sont désormais présents dans un nombre très important de bâtiments ou de biens de consommation. Sur la fin de la période, des inquiétudes commencent à apparaître sur la capacité de repérage des plus dangereux lors d'opérations de recyclage d'équipements ou d'entretien dans le second œuvre du bâtiment, en particulier dans les plus petites structures.

En termes de risques immédiats pour la santé, c'est cependant le caractère accidentel qui prédomine : que ce soit en termes de risques physiques ou mécaniques liés à une défaillance (ou à une maîtrise insuffisante) des installations ou bien en termes d'exposition respiratoire ou cutanée des travailleurs. En revanche, le dynamisme de l'activité économique et les mutations rapides dans la production plaident pour un caractère temporaire de ces dysfonctionnements : la dynamique sociale et l'encadrement réglementaire font que l'entreprise défaillante cesse rapidement son activité, quitte à repartir ensuite sur d'autres bases avec des équipements renouvelés.

Par ailleurs, le vieillissement de la population active est un élément de contexte important. Le saut technologique enregistré dans le monde industriel a permis de poursuivre l'automatisation de certaines tâches (notamment par l'utilisation de robots d'assistance physique) afin de diminuer la pénibilité physique et d'éloigner les travailleurs des sources potentielles d'exposition. Pour autant cette population vieillissante confrontée à une accélération du développement industriel et à l'apparition de nouvelles techniques de production n'est pas sans rencontrer des problèmes : le dynamisme des activités liées aux nanomatériaux est susceptible d'engendrer des difficultés d'adaptation pour cette population. En effet, bien que la situation économique des entreprises soit dans l'ensemble confortable, les mutations économiques et industrielles exercent une pression non négligeable sur le monde de l'entreprise à tous les niveaux.

Vénus beauté

En 2024, dans sa clinique varsoivienne, le docteur Zabik, spécialisé en chirurgie esthétique, met au point la Nanozabine, une substance composée de différentes nanoparticules, qui, une fois injectée sous la peau et activée par des radiations, arrête presque entièrement les effets visibles du vieillissement sur la peau en figeant les tissus. Une fois entamé, le traitement de la peau par Nanozabine doit être strictement réitéré chaque mois, au risque de voir la peau vieillir prématurément et se couvrir de tâches.

Si la communauté scientifique et la presse se répandent principalement en critiques sévères quant aux risques incalculables et à l'aspect contraignant du procédé, ce « miracle » de préservation jouit néanmoins d'une forte popularité auprès d'une clientèle fortunée en quête de jeunesse plastique éternelle.

Après avoir été administrée seulement dans la clinique du docteur Zabik, la Nanozabine bénéficie d'une autorisation limitée de mise sur le marché en Pologne, d'où elle est importée sous le manteau par quelques établissements qui offrent son administration en France.

C'est le cas de l'institut de beauté médicalisé Élysée Jouvence où travaille Isabelle, infirmière en soins esthétiques. Selon les instructions du médecin formé par le docteur Zabik, elle injecte, entre autres, la Nanozabine sous la peau des patients et place ensuite

ces patients sous des rayons ionisants pour activer et consolider la Nanozabine injectée.

Si les mesures de sécurité propres au domaine médical sont respectées dans l'enceinte d'Élysée Jouvence, un jour, alors qu'Isabelle s'apprête à injecter de la Nanozabine sous la peau d'une patiente, un geste malheureux lui fait glisser la seringue de la main. Celle-ci vient se planter dans son avant-bras : une partie de la dose est injectée en intramusculaire dans la face intérieure du bras.

Isabelle suit immédiatement le protocole prévu pour ce genre d'accident, et en absence de précédent, le médecin qui l'encadre estime que les risques encourus par Isabelle sont peu importants, puisque la Nanozabine est injectée aux patients. Isabelle se remet donc immédiatement au travail, administrant dans les heures et journées qui suivent plusieurs traitements de patients à la Nanozabine.

Lors de ces traitements, l'activation de la substance par les rayons ionisants expose également Isabelle à ces radiations qui suffisent pour déclencher la réaction de la Nanozabine qu'elle s'était accidentellement injectée dans les muscles brachiaux. C'est ainsi que la motricité de ces muscles commence à diminuer, portant fortement atteinte à la dextérité nécessaire pour l'exercice de son métier.

Conséquences en santé et sécurité au travail du scénario 2

Dans ce scénario, le développement des nanomatériaux est, comme les contextes politique et économique, difficile sauf dans quelques secteurs d'activité. Ces derniers qui ont connu un début de développement n'ont bénéficié que d'un soutien très chiche des pouvoirs publics (à l'aune des crédits disponibles) et le marché n'a pris la relève que dans la mesure où un retour sur investissement rapide pouvait être envisagé. Dans les autres domaines, aucun investissement n'a été effectué car, à la suite de crises sanitaires graves, les nanomatériaux sont l'objet de toutes les méfiances de la part de la société, comme toutes les innovations en général. Cela induit notamment, pour les entreprises qui en utilisent, un repli marqué sur elles-mêmes et une volonté de se protéger du regard et des interrogations du public. On reste donc dans une logique d'activité de niches sans perspective de développement généralisé à court ou moyen terme. Dans ce contexte économique défavorable, le positionnement de certains producteurs et utilisateurs de nanomatériaux (ou de matériaux en contenant) sur des secteurs économiquement stratégiques leur assure cependant une bonne rentabilité. Pour autant, compte tenu de l'attitude de la société, ces entreprises adoptent la même posture de grande discrétion pouvant aller jusqu'au secret.

Les systèmes publics de prévention des risques professionnels ne sont donc pas les bienvenus dans un contexte d'opacité : leurs moyens et leurs capacités d'intervention sont de toute façon très limités. Pour autant, la pression sociétale fait que, notamment à travers une application sans nuance du principe de précaution, les quelques interventions de l'État peuvent peser gravement sur les entreprises exerçant leur activité dans les domaines de technologie avancée, notamment celles produisant ou mettant en œuvre des nanomatériaux. Globalement les entreprises évoluent dans un contexte où les risques juridiques sont forts.

Ce développement général limité se retrouve dans les études de toxicologie consacrées aux nanosciences : très faiblement financés, un petit nombre de laboratoires de recherche travaillent sur les effets toxicologiques et peinent à affirmer leur existence au milieu de toute une littérature de vulgarisation plus axée sur l'à peu près et le sensationnel que sur la rigueur scientifique. La connaissance des dangers est donc très lacunaire.

Les quelques secteurs producteurs et utilisateurs ont pris la mesure de cette situation. Les grosses entreprises des secteurs porteurs (énergie, transport, etc.), à la forte visibilité, limitent autant que possible l'utilisation des nanomatériaux dans leurs propres installations. La tendance à la sous-traitance à de petites structures industrielles type TPE et PME est donc très répandue et fortement empreinte de discrétion, même si le nombre de TPE/PME fabriquant ou manipulant des nanomatériaux reste relativement limité vu l'étroitesse du marché. Ces entreprises, compte tenu de la situation économique défavorable, sont elles-mêmes soumises à une concurrence exacerbée et disposent donc d'une latitude décisionnelle et financière faible face aux donneurs d'ordre (dont nous avons vu précédemment que certains peuvent pourtant dégager des marges financières significatives). Pour répondre aux exigences de la concurrence, l'outil de production est en permanence adapté tant bien que mal, selon les entreprises et les fabrications, aux nanomatériaux produits ou mis en œuvre : les investissements sont faibles, certains équipements sont vieillissants. Cette flexibilité forcée a pour résultat que la question de la sûreté des procédés se pose avec acuité dans toutes les phases des *process* dans ces petites entreprises.

C'est également le cas pour les opérations liées à la maintenance ou au nettoyage pour lesquelles les équipements de protection individuelle (EPI) sont la ressource essentielle (voire unique) en matière de prévention des risques professionnels, sans que des études pointues sur leur efficacité aient pu être menées. Le secteur du traitement des déchets et de la dépollution se situe dans la droite ligne de cette situation : incertitude sur la connaissance des dangers, difficultés d'adaptation à des situations pour lesquelles les données de base de l'évaluation des risques sont lacunaires et la connaissance des expositions fragmentaire, risques liés à une sûreté des procédés défaillante... Le contexte n'a pas non plus conduit à l'apparition de savoirs spécialisés, et les entreprises se chargeant des opérations de maintenance ou de nettoyage appliquent peu ou prou et sans discernement les méthodes développées auparavant pour prévenir les risques rencontrés avec les agents chimiques classiques. Il en est de même des opérations de fin de cycle de vie des équipements ou de recyclage qui interviennent dans un contexte d'opacité et de connaissance lacunaire des risques.

Dans ce contexte, les entreprises concernées à tous les niveaux de la chaîne de production sont soumises à différents types de risques liés principalement aux possibles dysfonctionnements des procédés et aux défauts d'organisation (fortes contraintes temporelles) :

- incendie et explosion,
- multi-exposition à tous types d'agents chimiques dangereux, y compris certains nanomatériaux : ces aspects sont particulièrement importants dans ce scénario, eu égard au déficit d'information stabilisée quant à la toxicité des nanomatériaux ; c'est bien sûr surtout la toxicité à moyen et long terme qui est en jeu,
- risques mécaniques,
- risques liés aux manutentions et aux postures, en particulier dans un contexte de fortes contraintes liées aux exigences de la production (adaptabilité forcée et aléatoire de structures industrielles non conçues pour cette versatilité).

Certains de ces risques sont encore renforcés dans un contexte de fort chômage et de population active vieillissante, soumise à de fortes exigences au poste de travail. Les ressources consacrées à la formation sont également limitées.

Compte tenu de la risquophobie ambiante, de la mise à l'index des nanomatériaux par la société et de la culture du secret adoptée généralement par les entreprises (donneuses d'ordres et sous-traitantes), les travailleurs peuvent être confrontés à des situations de conflit éthique. La confrontation entre leur pratique professionnelle et le discours dominant peut conduire à des injonctions paradoxales, à travers une mise en demeure de respecter des procédures strictes (fort prescrit lié à la pression sociétale), sans disposer des moyens de les appliquer. Les risques psychosociaux prospèrent sur un terrain favorable. La perception des risques par les travailleurs fait la part belle à des phénomènes d'euphémisation ou de déni.

Un suivi efficace des travailleurs est rendu difficile pour plusieurs raisons : manque de moyens d'intervention des structures dédiées, absence de transparence sur les conditions de travail dans les TPE/PME, elles-mêmes souvent privées d'informations de la part des donneurs d'ordre. La dispersion des travailleurs exposés dans de petites entreprises ne favorise pas la connaissance des risques par la réalisation d'études de postes ou

épidémiologiques. Mais, compte tenu des questionnements de la société sur la problématique des nanomatériaux, le suivi est maintenu. Au bilan, il semble toutefois plus symbolique que réellement efficace

Nano start-up

En 2026, Nanozorg est une petite start-up qui produit des additifs pour résines spéciales à haute valeur ajoutée.

Cette production fait appel à un procédé ultraconfidentiel où des nanoparticules de métaux sont combinées à très haute température et sous pression élevée dans une atmosphère contrôlée contenant du xénon.

En raison de la forte toxicité des matériaux mis en œuvre par Nanozorg, le médecin de travail fait effectuer des tests sanguins à l'ensemble du personnel pour détecter l'éventuelle présence de ces nanoparticules dans les organismes des personnes impliquées dans le processus de production.

Or, les résultats de ces analyses montrent une concentration anormalement élevée chez un des ingénieurs de l'équipe, Karim, alors que celui-ci n'est pas en contact direct avec la fabrication effective des additifs.

Pour protéger le secret des procédés de fabrication de la concurrence, Karim construit les fours spéciaux dans lesquels les additifs sont élaborés. Cette activité génératrice d'une grande quantité de poussière extrêmement fine, se fait avec des précautions minimales dans l'atelier voisin de celui où, avec de très grandes précautions, Nanozorg produit ses additifs.

La construction des fours fait appel à des éléments d'un matériau composite spécial traité thermiquement pour résister à des conditions de pression et température

très élevées. Or, à l'insu de l'équipe de Nanozorg, ces plaques de résine contiennent les nano-additifs qu'ils fabriquent.

En effet, les additifs Nanozorg sont livrés à la société Plastiplak qui les incorpore aux résines qu'elle produit. Ces résines sont ensuite achetées par l'entreprise Moule-Insar qui les utilise pour fabriquer des éléments de plastique moulé à usage industriel. Les éléments de plastique commercialisés par Moule-Insar sont la base d'une gamme de produits de la société Thermarefortex qui fait subir à ces éléments des traitements thermiques et physiques afin de leur permettre de résister aux hautes pressions et à la chaleur.

Ce sont précisément des éléments fournis par Thermarefortex qu'utilise Karim pour construire les fours de production de Nanozorg. Les secrets de fabrication jalousement gardés de chacune des sociétés impliquées, et la part toujours plus petite des ingrédients initiaux à chaque étape de production, ont fait disparaître des fiches produits de Thermarefortex les nanoparticules toxiques mises en œuvre.

C'est ainsi que Karim, qui pourtant n'a jamais mis les pieds dans l'atelier de production haute sécurité de sa société, se retrouve avec une forte concentration de ces nanomatériaux dans le sang après avoir été exposé à la poussière ultrafine provenant de l'usage des éléments en plastique issus des fours.

Conséquences en santé et sécurité au travail du scénario 3

Si le développement des nanomatériaux n'a pas concerné l'ensemble des secteurs de l'industrie, il a très fortement impacté certaines activités dans lesquelles les progrès technologiques peuvent être assimilés à une révolution. En France notamment, la pharmacie/santé, la production d'énergie ou l'électronique ont vu leurs activités révolutionnées et fortement dynamisées. Ces progrès sont d'autant plus remarquables que la situation économique globale demeure difficile. Dans un contexte de très fort affaiblissement de l'État (strictement réduit aux tâches régaliennes), ce sont ces secteurs d'activité qui ont assumé la totalité de l'effort technique et financier : développement de la recherche, industrialisation, formation des travailleurs. La connaissance des nanomatériaux demeure néanmoins fragmentaire, la recherche en toxicologie ayant marqué le pas. Elle ne constitue pas une priorité pour les entreprises, l'État n'a pas les moyens de la soutenir, et la société civile n'est pas demandeuse.

La dérégulation du marché du travail est pratiquement complète et le contrat individuel entre l'entreprise et le travailleur est devenu la règle. La prévention est strictement du ressort des entreprises. À ce titre, elle est principalement orientée dans une logique de préservation de l'outil de production, et la réponse essentiellement assurancielles s'exprime majoritairement en termes de réparation et non pas en termes de prévention primaire. Dans le même ordre d'idée, la reconnaissance d'une maladie professionnelle est du ressort des tribunaux civils et s'exerce sous le régime de la preuve.

Pour autant, la prévention des risques professionnels n'a pas disparu. Mais, dépendante des choix effectués par l'entreprise, elle est souvent beaucoup plus développée dans les plus grosses d'entre elles qui tiennent à préserver et à fidéliser une main d'œuvre qualifiée, devenue rare dans un contexte de vieillissement global de la population active, et dont elle a supporté le coût de la formation qualifiante. Le socle réglementaire traitant de la prévention des risques professionnels, déjà réduit par rapport à ce qui existait au début de la période considérée, a été encore allégé pour les plus petites entreprises.

À travers ce panorama contrasté de la situation de la prévention des risques professionnels dans les différentes entreprises, on voit bien la très grande disparité du suivi dont peuvent bénéficier les travailleurs : très performant dans certains cas ou confondu avec un suivi individuel peu efficace à l'initiative du salarié, assuré par des structures plus ou moins spécialisées, voire par la médecine de ville dans certains cas.

L'essaimage sous forme de *start-up* s'est beaucoup développé. Il s'effectue dans une logique de prestations de sous-traitance, les grandes entreprises gagnant en souplesse et en réactivité en confiant des travaux à ces PME et TPE. Compte tenu du différentiel entre les niveaux de salaire et de protection sociale, les travaux à faible valeur ajoutée et/ou à risques plus élevés sont souvent confiés à des petites entreprises. Certaines d'entre elles ont néanmoins un rôle significatif en matière d'innovation et de développement de nouveaux produits. Elles peuvent même avoir développé des compétences spécifiques qui leur assurent une situation privilégiée (par rapport à la moyenne) dans les relations entre entreprises donneuses d'ordres et sous-traitantes. Les relations sociales dans ces entreprises particulières peuvent alors être du type décrit précédemment pour les plus grosses structures.

Les risques professionnels dans les PME et TPE sont logiquement liés à cette dépendance et à cette obligation de réactivité. Pour autant, le tableau est très contrasté. Le niveau élevé d'exigences d'un secteur comme la pharmacie et la dangerosité de certains produits (dont des intermédiaires) fabriqués (en particulier sous la forme nanométrique) imposent le respect de règles draconiennes, y compris pour des opérations qui ne sont pas directement liées à la production, comme la maintenance des installations ou le traitement des déchets. Ainsi, la décontamination des équipements revêt une importance capitale entre la production de deux lots et la protection du produit fini nécessite une décontamination très performante des installations et par là même une protection efficace de l'opérateur qui ne doit en aucun cas être susceptible de polluer la production. Dans d'autres cas, au contraire, la nécessité de préserver absolument le produit (au moyen de dispositifs de surpression par exemple) peut induire des difficultés particulières dans la protection des travailleurs. Globalement, le coût élevé des produits finis, résultant de la rareté de certains produits de base (métaux précieux, molécules issues du génie génétique) et d'une succession de nombreuses réactions et opérations de purification, constitue également un élément plaçant pour une bonne sûreté générale des opérations de production et de maintenance. Un tableau similaire peut être dressé pour la plupart des entreprises de la nanoélectronique. En revanche, d'autres secteurs industriels, engagés dans des productions de moindre valeur ajoutée, ne sont pas soumis aux mêmes contraintes.

C'est le cas en particulier des activités du bâtiment et des travaux publics qui constituent un cas d'espèce. En effet, ces industries incorporent depuis le début des années 2010 des nanomatériaux dans divers matériaux de structure et revêtements (bétons, asphaltes, verres, plastiques, etc.). Ces nanomatériaux peuvent être incorporés dans des installations fixes (type centrales à béton) aussi bien que juste avant l'emploi sur les chantiers : autant d'utilisations possibles dans des petites structures avec des moyens de prévention différents. Se pose aussi la question de la prévention des risques lors des interventions ultérieures sur les matériaux contenant ces nanomatériaux : rabotages, ponçages, démolition, déconstruction... avec bien sûr la question de leur identification.

Il est donc impossible de dresser un tableau général des risques professionnels des petites entreprises, tant ces derniers sont dépendants de la situation de chaque entreprise. Les PME et TPE sont susceptibles d'être confrontées à des accidents de process, avec pour conséquences des risques d'incendie, d'explosion et d'intoxication aiguë. En fonction du degré de développement du procédé de fabrication, le type d'accident et les niveaux de risque seront très variables : faibles pour des procédés très automatisés, beaucoup plus élevés pour des installations plus flexibles et faisant une part plus grande à l'intervention humaine. Il en est de même du risque de troubles musculosquelettiques, et plus largement des risques physiques, qui dépendra grandement du type d'organisation que l'entreprise devra (ou aura la latitude de) mettre en place.

En revanche, compte tenu de l'indifférence de la société face au développement des nanomatériaux (banalisés au même titre que d'autres produits de l'industrie manufacturière), les risques psychosociaux devraient se situer à un niveau faible. Pour autant, le haut niveau technique de certaines productions (notamment dans la pharmacie et la nanoélectronique, déjà citées) peut entraîner un niveau de protection des travailleurs extrêmement exigeant : isolement du monde extérieur, absence de contacts avec les collègues, haut niveau d'exigence dans la réalisation du travail compte tenu des enjeux économiques, gestuelle entravée, etc. Ces conditions d'exercice des tâches, indépendamment du rapport de la société aux nanomatériaux, peuvent constituer en elles-mêmes des causes de mal-être au travail, d'autant qu'elles peuvent s'accompagner de problèmes liés à la chaleur (port d'équipements de protection individuelle), à des postures contraignantes, etc.

Agrofibrose

En 2027, José, a 38 ans. Il est ouvrier agricole en Picardie. Après avoir travaillé pendant des années pour la même exploitation agricole céréalière, il a été hospitalisé suite à un malaise dans un champ. Depuis de longs mois déjà, il souffrait d'une toux sèche chronique qui avait même poussé sa compagne à faire chambre à part, tant les toussotements et sifflements dans la respiration de José l'incommodaient. José s'était aussi senti extrêmement faible, il avait perdu beaucoup de poids, et ressenti une forte gêne respiratoire, choses qu'il avait mises sur le compte de son anxiété au vu de ses difficultés quotidiennes.

A l'hôpital, alors que la radiographie des poumons ne montre aucune anomalie, c'est le scanner tomographique qui donne des indications claires qui sont ensuite confirmées par une biopsie : José souffre d'une fibrose pulmonaire dont les causes apparaissent d'abord mystérieuses, puisqu'aucune des origines conventionnelles de cette pathologie n'a été identifiée.

En fait, José a épandu pendant des années des fertilisants sur les champs de maïs de son employeur. Ces fertilisants contenaient notamment des boues d'épuration revalorisées.

En effet, les boues résiduelles du traitement des eaux usées offrent un bon apport de nutriments aux cultures agricoles. Leur utilisation sur les champs est une pratique courante à travers le monde.

De 2014 à 2027, la proportion des boues d'épuration épandues sur les surfaces agricoles et sylvicoles est passée de 60 à 85 % aux États-Unis, et de 34 à 72 % en Europe.

Néanmoins, les nanomatériaux artificiels utilisés dans de nombreux domaines trouvent souvent leur chemin vers les eaux usées urbaines, notamment les nanoparticules d'argent et de dioxyde de titane. C'est là que ces particules s'accumulent, et puisque les stations d'épuration n'ont aucun équipement prévu pour leur filtration, ils se retrouvent dans les boues résiduelles.

En outre, de plus en plus d'innovations technologiques pour l'épuration des eaux usées et la dépollution font appel aux nanomatériaux, ce qui accroît encore la concentration de ceux-ci dans les boues résiduelles. Lors de leur épandage sur les surfaces agricoles, ces nanoparticules artificielles sont libérées dans l'atmosphère, avec toutes les conséquences toxicologiques possibles pour la santé publique.

Si le cas de José n'est que de l'anticipation, en 2014 déjà, on rapporte aux États-Unis de fibroses pulmonaires survenant suite à l'épandage de boues d'épuration contenant des nanoparticules artificielles, ce qui concorde avec les résultats d'études montrant des pathologies pulmonaires chez des rats de laboratoires exposés à des nanomatériaux.

Conséquences en santé et sécurité au travail du scénario 4

L'Europe des nations ayant été jugée en situation d'échec, la primauté a été donnée à une organisation politique faisant la part belle à des régions, supposée mieux répondre aux défis industriels et économiques ainsi qu'aux souhaits et besoins des citoyens. Cette version du fédéralisme s'est notamment appuyée sur la capacité revendiquée des régions (souvent transfrontalières dans ce cas de figure) à développer des domaines d'excellence à partir des spécificités et des points forts de leurs tissus académiques et industriels. De fait, bien qu'inégaux géographiquement et laissant subsister d'assez fortes disparités, les résultats ont suivi, et la situation économique s'est globalement améliorée tout au long de la période considérée.

Le même modèle de spécialisation régionale a également été appliqué aux nanomatériaux avec pour résultat une spécialisation correspondante dans les industries manufacturières utilisatrices. Il en résulte un réseau dense de petites et moyennes entreprises fonctionnant localement en réseau, très bien épaulées par des structures de type consulaire déployées notamment à travers des pôles de compétitivité. Ces structures régionales traitent bien sûr également des questions de santé et de sécurité au travail et au niveau de la gouvernance appliquent les règles décidées à l'échelon européen, basées sur une cogestion entre syndicats patronaux et syndicats de salariés. Le suivi médical des travailleurs répond à des exigences très générales définies au niveau européen, mais il est précisé et piloté par les instances régionales. Cette cogestion s'exerce dans un contexte où les débats de société, en particulier concernant les nanomatériaux, apparaissent comme relativement anesthésiés, notamment du fait de la prospérité ambiante.

Si les résultats économiques ont été au rendez-vous, les résultats technologiques sont plus mitigés : certains développements se sont arrêtés à un niveau inférieur à ce qui était espéré. Une trop forte spécialisation de chaque région et une mutualisation insuffisante des connaissances à l'échelon européen ont été alors incriminés. On a aussi identifié des freins au développement de nouveaux types de nanomatériaux, une évaluation insuffisante de leur toxicité, des retards dans l'industrialisation des nouveaux produits et des évolutions lentes des procédés existants. Tout cela s'est accompagné d'un rôle accru accordé à la normalisation, résultat d'une recherche poussée du compromis. De plus, si compte tenu de la spécialisation de chaque région, les échanges économiques sont importants, du point de vue des ressources humaines, les considérations locales dominent : la formation des travailleurs est très axée sur les besoins locaux et les entreprises y prennent une part prédominante, notamment à travers leurs liens avec l'Université. La formation constitue un enjeu important dans la mesure où les disparités entre les régions et la pénurie de main d'œuvre enregistrée dans certaines d'entre elles ont abouti à une immigration intra- et extra-européenne importante.

En matière de risques professionnels, si les niveaux de sinistralité restent constants, ils recouvrent une réalité contrastée : un taux en baisse progressive et stabilisé à un niveau très faible pour la très grande majorité des activités, obéré, de façon aléatoire, par quelques accidents dont certains sont très graves. Les études diligentées à la suite de ces accidents incriminent généralement une évaluation insuffisante des risques liés à l'introduction mal maîtrisée de nouveaux paramètres d'innovation dans des processus généralement considérés pourtant comme sûrs.

Ces statistiques sur la sinistralité concernent pour l'essentiel les risques d'accident. En effet, les études consacrées aux maladies professionnelles sont pour la plupart essentiellement descriptives (signalements de cas) : la standardisation minimale imposée par l'échelon européen se révèle insuffisante pour permettre une colligation pertinente (et surtout efficace) des données disponibles au-delà de l'échelon régional. Le niveau des connaissances en toxicologie restant globalement faible et la discipline n'étant pas considérée comme prioritaire lors des arbitrages dans la distribution des crédits des pôles de compétitivité, aucune dynamique n'a été créée dans le domaine de l'évaluation des risques, en particulier professionnels. Quelques alertes sanitaires ont été déclenchées à l'échelon régional sans que les investigations puissent être menées très loin (l'incertitude demeure), ni que leurs résultats suscitent de réaction à l'échelon régional ni que l'échelon européen se saisisse de la question : à l'échelle de chaque région, les effectifs concernés restent faibles. Ces alertes sont notamment intervenues dans des secteurs comme le second œuvre du bâtiment, lors d'opérations d'entretien ou de rénovation, ou dans des activités comme le recyclage des biens d'équipements. Cependant, compte tenu de la relative nouveauté des nanomatériaux les plus utilisés, le recul sur les éventuelles conséquences de ces expositions reste faible, d'autant que très peu d'études de toxicité chronique ont été réalisées. La réalisation d'études épidémiologiques dans un contexte de vieillissement de la population active, dont la durée d'exposition totale aux nanomatériaux va en augmentant, pourrait néanmoins apporter des données dans les années à venir.

Ainsi, si, comme on l'a vu précédemment, la maîtrise des procédés est généralement bonne, grâce notamment à l'expérience acquise au cours du temps, les opérations particulières que constituent notamment la maintenance et le nettoyage/décontamination des installations sont plus ou moins bien maîtrisées. Dans les pôles de compétitivité qui ont investi dans ces problématiques, notamment parce que le volume d'activité sur le marché local justifiait la création d'entreprises spécialisées bien insérées dans le tissu industriel local, les conséquences en santé et sécurité au travail sont analogues à celles décrites pour le scénario 1 ; c'est le caractère accidentel qui domine dans un contexte global d'opérations bien conduites.

En revanche, quand la masse critique n'est pas localement atteinte, des entreprises locales non spécialisées sont amenées à intervenir sur des procédés très disparates, tant dans le domaine des nanomatériaux que dans d'autres secteurs industriels. On retrouve là les caractéristiques du scénario 2, marqué par une forte sinistralité alors que les conditions économiques d'exercice de l'activité sont pourtant beaucoup plus favorables.

Cependant, parallèlement, ces activités d'appui à la production étant largement répandues, un certain nombre de grosses sociétés ont développé une activité à l'échelon européen, ce qui permet un retour d'information et une relative standardisation des techniques utilisées. Mais, compte tenu de la primauté donnée aux régions, elles ont été contraintes de donner un fort ancrage local à leur implantation à travers la création de filiales. Les conséquences en santé et sécurité au travail ressortissent alors de celles décrites dans le scénario 3. Les filiales locales bénéficient de la capacité d'analyse acquise grâce à la mutualisation des connaissances assurées par la maison mère, mais les mesures de prévention adoptées peuvent parfois manquer de spécificité ou de pertinence.

VEP 2 · novembre 2015

© INRS · ISBN 978-2-7389-2216-8 · Disponible uniquement en version électronique
Crédit photos de couverture : Gaël Kerbaol/INRS

Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris · Tél. 01 40 44 30 00 · www.inrs.fr · e-mail: info@inrs.fr

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite.
Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du code de la propriété intellectuelle). La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de trois ans et d'une amende de 300 000 euros (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).