

## Nanotechnologies

# NANOMATÉRIAUX MANUFACTURÉS: QUELLE PRÉVENTION À L'HORIZON 2030?

Considérés comme l'un des moteurs possibles de la croissance économique des prochaines décennies, les nanomatériaux manufacturés suscitent néanmoins des inquiétudes pour la santé. Afin d'anticiper les risques éventuels pour les salariés amenés à les manipuler, plusieurs scénarios portant sur le développement des nanomatériaux manufacturés à l'horizon 2030 et la prévention associée ont été envisagés.

**MANUFACTURED NANOMATERIALS: WHAT PREVENTION GOING FORWARD TO 2030? – Considered as one of the possible locomotives of economic growth for the coming decades, manufactured nanomaterials are also giving rise to health concerns. In order to anticipate the possible risks for employees who have to handle them, various scenarios have been considered regarding the development of manufactured nanomaterials over the period up to 2030, and regarding related prevention.**

MYRIAM  
RICAUD  
INRS,  
département  
Expertise  
et conseil  
technique

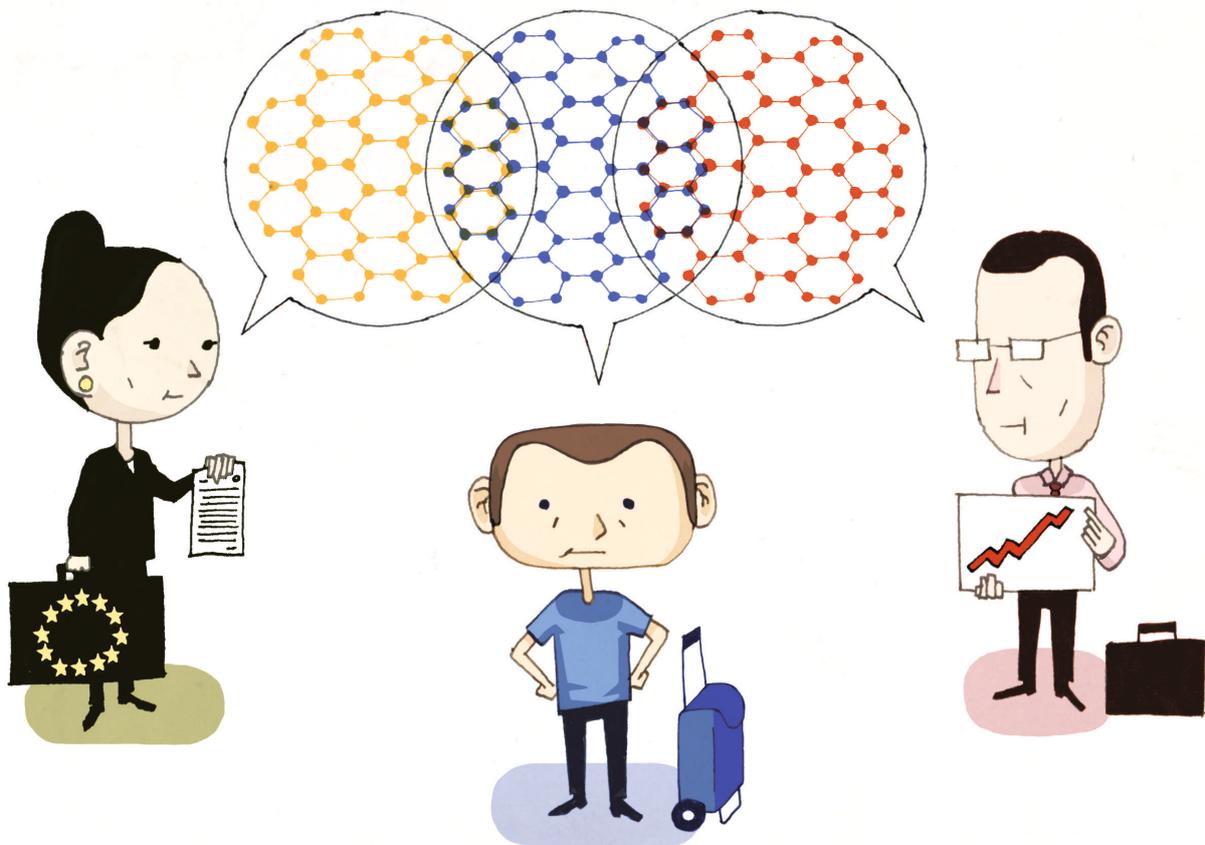
**D**u fait de leurs propriétés variées et souvent inédites, les nanomatériaux manufacturés ouvrent de multiples perspectives. Des budgets considérables sont dédiés à la recherche et au développement à travers le monde. Les entreprises fabriquant ou utilisant des nanomatériaux sont chaque jour plus nombreuses. Or, les connaissances sur la toxicité des nanomatériaux manufacturés demeurent parcellaires, tout comme les données relatives aux expositions professionnelles. Dans ce contexte, développer puis proposer aujourd'hui et demain des solutions de prévention adaptées s'avère indispensable mais délicat. L'INRS, en partenariat avec l'AISS<sup>1</sup>, l'Anses<sup>2</sup>, la Carsat Alsace-Moselle, l'InVS<sup>3</sup>, l'Institut Jean-Lamour, l'école des Ponts ParisTech, la Suva<sup>4</sup> et l'université de Bretagne-Sud, a mené une action de prospective portant sur le développement des nanomatériaux manufacturés à l'horizon 2030 et les conséquences en santé et sécurité au travail dans les petites structures en France. Quatre scénarios ont ainsi été envisagés. Ces futurs possibles doivent permettre de mieux appréhender les risques associés à ces matériaux prometteurs.

### Un engagement fort et fructueux de l'État et des entreprises: un développement massif

Dans le premier scénario, les années 2020 ont été marquées par une succession d'innovations

majeures, qui ont eu pour effet de doper la recherche et la production. L'État et les entreprises ont investi massivement dans les nanomatériaux, levant ainsi rapidement la majorité des verrous scientifiques. Cette dynamique a conduit à la naissance d'une multitude de petites et moyennes entreprises, en partie grâce à des commandes et à des subventions de l'État. De grandes entreprises coexistent ainsi avec une myriade de plus petites structures. Les nanomatériaux manufacturés sont donc, depuis une petite dizaine d'années, l'un des domaines d'excellence de la France, poussés par une implication forte de l'État et des entreprises françaises.

Conscients que la question des risques pouvait être un réel frein au développement des nanomatériaux, l'État et les industriels ont financé des études portant sur la toxicité des nanomatériaux grâce à la mise en place d'une taxe acquittée par les entreprises. Ces travaux ont montré une bonne prédictivité des outils utilisés, tant pour l'évaluation des dangers des nanomatériaux que pour la caractérisation des expositions. Les risques sanitaires et environnementaux des nanomatériaux et de leurs applications sont désormais évalués par les industriels *a priori*, c'est-à-dire avant commercialisation et au cas par cas. Les entreprises sont donc en mesure de mettre en place, si nécessaire, une prévention des risques adaptée. Celle-ci repose sur l'optimisation des équipements de prévention traditionnels et demeure donc accessible



© Nathanaël Tardif pour l'INRS

à tous. Elle s'accompagne également d'une maîtrise des rejets dans l'air et dans l'eau et d'une gestion des déchets *ad hoc*.

Les méthodes d'évaluation des risques professionnels bénéficient à la fois des avancées techniques et de la dynamique financière correspondante. Même si les connaissances toxicologiques ne sont pas toujours complètes, l'utilisation de modèles de relations structure/activité permet de catégoriser correctement les nouveaux nanomatériaux et de mettre en place un niveau de prévention des risques professionnels adapté. Différents organismes spécialisés ont en charge la prévention des risques professionnels et les négociations entre partenaires sociaux ont abouti à la signature de plusieurs accords de branche. De manière générale, la maîtrise des procédés s'est améliorée en tirant partie de l'ensemble des progrès technologiques. Cela vaut également pour les opérations souvent critiques de maintenance, de nettoyage... Quant aux équipements de protection collective et individuelle, ils ont connu des évolutions importantes, notamment en termes de spécificité, d'efficacité et de confort.

Du côté de la société civile, le développement accéléré des nanomatériaux n'a pas eu d'effet repoussoir. Au contraire, après quelques débuts difficiles, un débat serein encouragé par l'État et la Commission européenne s'est instauré entre la société, les experts, les scientifiques, le pouvoir politique et le monde

industriel. Ces échanges ont concouru à un accroissement significatif de la diffusion de l'information, fortement encouragée par les parties prenantes. La société a ainsi intégré aisément les nanomatériaux manufacturés, d'autant plus qu'ils ont été rapidement identifiés comme porteurs d'une amélioration sensible de la qualité de vie.

Ce panorama favorable doit cependant être nuancé. L'apparition continue de nouveaux produits et la courte durée de vie de certains d'entre eux imposent aux entreprises une adaptation permanente. D'où un risque de décalage, même transitoire, entre cette adaptation et les besoins réels intégrant la prise en compte de la santé et de la sécurité. La mobilité des personnels, encouragée par le dynamisme du secteur, peut par ailleurs constituer un obstacle à un suivi et à une traçabilité corrects de leurs expositions. Des inquiétudes commencent également à apparaître sur la capacité de repérage des nanomatériaux les plus dangereux, par exemple lors d'opérations de recyclage d'équipements.

En termes de risques immédiats pour la santé, c'est le caractère accidentel qui prédomine. En revanche, la vitalité du secteur et les mutations rapides 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.



### **Un rejet éclairé de la part de la société : un développement dans quelques filières stratégiques**

Le deuxième scénario prend appui sur une succession de crises économiques et politiques dans le monde. La situation financière de la France s'est fortement 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 R&D.

La déroute financière s'est accompagnée d'une remise en cause profonde par la société du modèle de développement économique et politique. Plusieurs crises sanitaires ont induit une perte de confiance envers les pouvoirs publics et le monde industriel. Certaines entreprises pâtissent même d'une image fortement dépréciée dans la société. En parallèle, la conscience environnementale des citoyens n'a jamais été aussi forte. La société civile se mobilise ainsi activement contre toute découverte jugée suspecte. Chaque nouvelle technologie est soigneusement jaugée et fait ensuite l'objet d'une communication intense.

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. Compte tenu des faibles budgets alloués au développement des nanomatériaux, l'innovation est fortement ralentie. De grandes entreprises d'envergure internationale se sont rapidement mais discrètement positionnées sur ces quelques domaines prioritaires qui leur assurent une bonne rentabilité. Une tendance à la sous-traitance à de plus petites structures est répandue. Ces petites entités 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'ordres.

Par ailleurs, les études menées sur les dangers des nanomatériaux 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. Les financements accordés à ces questions capitales demeurent insuffisants et de nombreuses lacunes persistent.

Dans ce contexte, l'État se voit contraint à une application stricte du principe de précaution. De nouvelles réglementations conduisant à une interdiction de certains nanomatériaux sont ainsi entrées en vigueur. Les entreprises les plus en pointe continuent à appliquer les méthodes de protection les plus élevées possible en matière de sécurité. Dans les autres entreprises, notamment les plus fragiles, la maîtrise de risques s'avère bien souvent sommaire.

Au vu du contexte économique très difficile, les structures publiques de prévention des risques professionnels ne sont généralement pas les bienvenues dans les entreprises, leurs moyens et leurs capacités d'intervention étant par ailleurs très limités. Pour autant, les interventions de l'État peuvent peser gravement sur les entreprises, du fait de la pression sociétale notamment. Les grands groupes, à la forte visibilité, limitent autant que possible la mise en œuvre de nanomatériaux dans leurs propres installations. Pour répondre aux exigences d'une concurrence exacerbée, l'outil de production, dans les petites entreprises sous-traitantes notamment, est tant bien que mal adapté en permanence. Cette flexibilité forcée fait que la question de la sûreté des procédés et de la réalisation des opérations de maintenance, de nettoyage... se pose avec acuité, notamment dans les petites entreprises. Le contexte n'a pas conduit à l'apparition de savoirs spécialisés, et les entreprises appliquent peu ou prou et sans discernement les méthodes développées auparavant pour prévenir les risques rencontrés avec les agents chimiques classiques. Les entreprises concernées sont soumises à différents types de risques liés principalement aux possibles dysfonctionnements des procédés et aux défauts d'organisation : incendie et explosion, multi-exposition à tous types d'agents chimiques dangereux, y compris certains nanomatériaux, risques mécaniques et risques liés aux manutentions et aux postures.

Compte tenu de la « risquophobie » ambiante et de la culture du secret adoptée par les entreprises, les travailleurs peuvent être confrontés à des situations de conflit éthique. Les risques psychosociaux prospèrent sur un terrain favorable. Un suivi efficace des travailleurs est rendu difficile en raison du manque de moyens d'intervention des structures dédiées et de l'absence de transparence sur les conditions de travail. La dispersion des travailleurs exposés dans de petites entreprises ne favorise pas la connaissance des risques. Mais, compte tenu des questionnements de la société, le suivi des salariés est maintenu.

### **Une mainmise industrielle : un développement dans des secteurs porteurs**

Le troisième scénario est marqué par le prolonge-

ment de la crise économique de 2007. Si la volonté politique d'un maintien d'activités innovantes en France a été clairement affichée, elle n'a pas été suivie d'effets. Les budgets alloués à la R&D par l'État en France ont ainsi progressivement diminué. L'initiative publique a très nettement marqué le pas. Elle a été relayée par l'initiative privée, mais seulement dans certains secteurs d'activité jugés porteurs.

Ainsi, la majorité des secteurs d'activité a volontairement fait l'impasse sur les nanomatériaux. L'agroalimentaire, le textile, l'emballage et la cosmétique 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, alors même que la nanomédecine et la nanoélectronique se sont très vite imposées en France comme des secteurs d'activité clés, soutenus par des efforts financiers importants consentis dans la R&D par de grandes entreprises d'envergure internationale. Afin de les aider dans cette quête perpétuelle vers l'innovation, elles ont accompagné la création d'une myriade de petites structures qui assurent généralement des missions de sous-traitance, mais développent également en interne quelques marchés à moyenne diffusion.

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 dans la société civile à propos des orientations politiques et économiques se sont réduits. 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 se précarise. Les enjeux sanitaires et environnementaux ne concernent que peu cette population qui subit pleinement les effets de la crise économique.

La crise a conduit l'Europe et les États à limiter fortement leur implication dans le financement d'études portant sur les risques sanitaires et environnementaux des nanomatériaux. 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*. Les risques demeurent *in fine* toujours difficilement évaluables. Dans ce contexte, les entreprises les plus prospères, généralement les plus grosses, appliquent des méthodes de protection strictes et poussées en matière de sécurité. Dans les autres entreprises, notamment les plus petites, la maîtrise des risques s'avère bien souvent très incomplète.

De fait, la prévention des risques professionnels est strictement du ressort des entreprises et est principalement orientée vers une logique de préservation de l'outil de production. La réponse, essentiellement

assurancielle, s'exprime majoritairement en termes de réparation et non pas en termes de prévention primaire. Pour autant, la prévention n'a pas disparu. Mais elle est dépendante des choix effectués par l'entreprise et s'avère plus développée dans les plus grandes d'entre elles, qui tiennent à préserver et à fidéliser une main d'œuvre qualifiée.

La prise en compte des risques professionnels dans les petites entités est très contrastée, même au sein d'un secteur. Le niveau élevé d'exigences d'un domaine comme la pharmacie impose généralement le respect de règles draconiennes, y compris pour des opérations comme la maintenance. Dans certains cas, au contraire, la nécessité de préserver absolument le produit peut induire des difficultés particulières dans la protection des travailleurs. En revanche, d'autres secteurs industriels comme le BTP, engagés dans des productions de moindre valeur ajoutée, ne sont pas soumis aux mêmes contraintes.

Les petites structures sont globalement susceptibles d'être confrontées à des accidents sur les procédés, avec pour conséquences des risques d'incendie, d'explosion et d'intoxication aiguë mais également des troubles musculosquelettiques. En revanche, compte tenu de l'indifférence de la société face au développement des nanomatériaux, les risques psychosociaux sont limités. Pour autant, la technicité de certaines productions peut entraîner un niveau de protection des travailleurs extrêmement exigeant, et donc susceptible de causer du mal-être.

### **Une volonté régionale soutenue : un développement en fonction des compétences locales**

Enfin, le quatrième scénario se traduit par le retour d'une croissance économique significative dans les pays développés. Cette embellie est due en grande partie à l'émergence d'une Europe forte - celle des régions plutôt que celle des nations. Dans ce contexte favorable, les régions les plus riches, pour certaines transfrontalières, ont investi massivement dans le domaine des nanomatériaux. En fonction de la spécificité du tissu industriel local, bien souvent en adéquation avec la recherche académique déjà implantée, les financements sont portés sur des secteurs d'activité bien précis. Les aides publiques européennes sont complétées par un effort financier soutenu consenti de la part des entreprises. Compte tenu de la multiplicité des secteurs d'application concernés, de nombreuses entreprises de faible taille ont pu, grâce au soutien de l'Europe et des régions, investir le domaine.

La prospérité retrouvée et ses fruits partagés ont concouru à apaiser la population, notamment dans les régions les plus favorisées. 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, les citoyens faisant pleinement confiance aux décisions émanant de l'Europe et des régions. Des pôles d'excellence ont ainsi été créés dans toute l'Europe dans les domaines de l'électronique, de l'agroalimentaire, de la pharmacie, de la cosmétique, du textile, de l'énergie, de l'emballage et de la plasturgie. L'utilisation des nanomatériaux manufacturés a très fortement contribué à l'image de réussite technologique de ces secteurs et donc à la richesse des régions associées. Seuls quelques domaines comme la défense demeurent à la main des États.

## POUR EN SAVOIR +

- *Les nanomatériaux. Bilan et perspectives en santé et sécurité au travail*, INRS, DO2, 2013
- *Les nanomatériaux, Définitions, risques toxicologiques, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention*, INRS, ED 6050, 2012
- *Les nanomatériaux, Risques pour la santé et mesures de prévention*, INRS, ED 6064, 2011
- *Nanomatériaux. Prévention des risques dans les laboratoires*, INRS, ED 6115, 2012
- *Aide au repérage des nanomatériaux en entreprise*, INRS, ED 6174, 2014

Les budgets alloués tant par l'Europe que les régions portent essentiellement sur le développement de nouveaux nanomatériaux au détriment des recherches portant sur leurs risques potentiels. Un écart important persiste donc entre les avancées technologiques associées aux nanomatériaux et la connaissance de leurs impacts éventuels sur la santé. Les outils disponibles, tant pour l'évaluation des dangers des nanomatériaux que pour la caractérisation des expositions, ne démontrent qu'une faible prédictivité.

Malgré cette méconnaissance des risques et en l'absence de décision politique au niveau national, la commercialisation de nanomatériaux s'intensifie avec la possibilité que certains, dont les dangers potentiels auront été sous-évalués ou ignorés, induisent dans les prochaines années la survenue d'effets graves. Dans ce contexte d'incertitude, les entreprises les plus florissantes mettent en place les méthodes de protection les plus élevées possible en matière de sécurité, sans toutefois savoir si elles sont suffisantes. Dans les autres entreprises, notamment les plus petites, la maîtrise des risques s'avère bien souvent très lacunaire.

Les risques professionnels sont généralement pris en charge par des structures de type consulaire déployées notamment à travers des pôles de compétitivité. Ces entités régionales appliquent les règles décidées à l'échelon européen, basées sur une cogestion entre syndicats patronaux et syndicats de salariés. Globalement, 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. Les études diligentées à la suite de ces accidents incriminent généralement une évaluation insuffisante des risques liés à l'introduction de nouveaux paramètres dans des processus généralement considérés 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. Le niveau de connaissances en toxicologie reste globalement faible, la discipline n'étant pas considérée comme prioritaire. Au sein des régions où les pôles de compétitivité ont investi dans la prévention des risques professionnels - notamment parce que le volume d'activité sur le marché local justifiait la création d'entreprises spécialisées - 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, il existe alors une forte sinistralité. Par ailleurs, un certain nombre de grosses sociétés ont développé une activité à l'échelon européen. 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. Ces filiales 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. ●

1. *Association internationale de la sécurité sociale.*
2. *Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.*
3. *Institut national de veille sanitaire.*
4. *Caisse nationale suisse d'assurance.*

## Remerciements

Cet exercice a été conduit par un groupe de travail pluridisciplinaire composé des experts suivants: Stéphane Binet (INRS), Nathalie Dedessus-Le Moustier (Université de Bretagne-Sud), Aurélie Delemarle (École des Ponts ParisTech), Stéphanie Devel (INRS), Éric Drais (INRS), Jean-Raymond Fontaine (INRS), François de Jouvenel (Futuribles), Michaël Koller (Suva), Éric Gaffet (Institut Jean-Lamour), Irina Guseva Canu (InVS), Cécile Ouilic-Tissier (Carsat Alsace-Moselle), Martine Reynier (INRS), Myriam Ricaud (INRS), Nathalie Thieriet (Anses) et Olivier Witschger (INRS).

Les déclinaisons en santé et sécurité au travail ont été rédigées par un groupe d'appui interne à l'INRS (composé d'Agnès Aublet-Cuvelier, Stéphane Binet, Benoit Courrier, Stéphanie Devel, Michel Héry, Marc Malenfer, Michel Pourquet, Myriam Ricaud, Alain Simonnard, Jérôme Triolet), puis discutées avec les experts du groupe de travail.