

European Federation
of Building
and Woodworkers



Les nanoproducts dans le secteur européen de la construction

État des connaissances en 2009 Rapport de synthèse

Fleur van Broekhuizen
Pieter van Broekhuizen

Amsterdam, novembre 2009



Titre : La nanotechnologie dans le secteur européen de la construction – État des connaissances en 2009 – Rapport de synthèse
Auteurs : F.A. van Broekhuizen et J.C. van Broekhuizen
Groupe de pilotage : R. Gehring (FETBB), D. Campogrande (FIEC), J. Gascon (FCC, Espagne), U. Spannow (3F, DK), J. Waage (FNV Bouw, NL)

Le présent rapport a été réalisé à la demande de la FETBB (Fédération européenne des travailleurs du bâtiment et du bois) et de la FIEC (Fédération des industries européennes de la construction) dans le cadre du dialogue social européen.

Remerciements

L'étude a été subventionnée par la Direction générale de l'Emploi de la Commission européenne (convention de subvention n° VS/2008/0500 – SI2.512656) au titre du dialogue social européen dans le secteur de la construction.

Les auteurs remercient les sociétés (entreprises de construction, producteurs de matières premières, fabricants de produits, entreprises de traitement des déchets), les organisations sectorielles, les instituts de R&D et les chercheurs pour la précieuse contribution qu'ils ont apportée à l'étude, leurs idées et l'ouverture dont ils ont fait preuve au cours des discussions.

De plus amples informations sur le rapport peuvent être obtenues à l'adresse suivante :

IVAM UvA BV

Amsterdam-NL

Tél. : +31 20 525 5080

www.ivam.uva.nl

Mél : office@ivam.uva.nl

Des extraits du présent rapport peuvent être publiés à condition que la source soit clairement indiquée

IVAM UvA b.v. décline toute responsabilité pour tout dommage ou préjudice résultant de l'utilisation ou de l'application des conclusions du présent rapport.

Résumé

Le présent rapport contient une étude sur la disponibilité et l'utilisation des nanoproducts ainsi que sur les questions de santé et de sécurité qu'ils soulèvent dans le secteur européen de la construction en 2009. Ses conclusions reposent sur une étude européenne menée auprès d'employeurs, de travailleurs et de représentants des travailleurs du secteur de la construction, des interviews approfondies de plusieurs acteurs de premier plan et une étude détaillée de la littérature.

La prise de conscience des différents acteurs du secteur de la construction quant à la disponibilité et aux performances des nanomatériaux est très limitée. C'est le cas des employeurs et des employés de la construction, mais aussi des professions connexes telles que les architectes et les ingénieurs du bâtiment et des donneurs d'ordre.

Seul un nombre limité de nanoproducts se retrouvent actuellement sur les chantiers, à cause de ce manque d'information et parce que les composants nanométriques sont souvent trop chers pour être des produits compétitifs. Les principaux types de produits rencontrés sur le marché sont les matériaux à base de béton et de ciment améliorés aux nanoparticules, les nanorevêtements et les matériaux d'isolation. La recherche et le développement se poursuivent toutefois intensément et on s'attend à ce que la part de marché des nanoproducts et leur diversité s'accroissent en raison des caractéristiques particulières qu'ils présentent ou pourraient présenter.

Ces mêmes produits peuvent par contre faire planer de nouveaux risques sur la santé et la sécurité des travailleurs sur le chantier, risques que la science commence seulement à comprendre, surtout lorsque le travail entraîne la génération de nanoparticules ou d'aérosols. Les activités typiques présentant des risques potentiellement élevés d'exposition aux nanoparticules sont l'application de nanoproducts sous forme humide ou de poussière, l'usinage de nanoproducts séchés ou préfabriqués et le nettoyage ou l'entretien des matériaux et de l'équipement utilisés. Des informations détaillées sur la composition du produit et sur les problèmes possibles pour la santé et la sécurité liés aux nanomatériaux font toutefois défaut en général. On constate en outre que les informations dont le fabricant de matières premières dispose se perdent en aval de la chaîne d'utilisation.

Il est par conséquent très difficile à l'entreprise de construction moyenne de procéder à une évaluation adéquate des risques et d'aménager le lieu de travail de manière à ce qu'il soit sûr pour ses employés. Face à l'inconnu, on peut décider d'adopter une approche précautionneuse, mais le développement d'un certain nombre d'outils pour aider les entreprises de construction à mettre en œuvre cette approche (comme un système d'enregistrement et de notification, des valeurs de référence pour les nanomatériaux et les bonnes pratiques pour un certain nombre d'activités à haut risque) est souhaitable pour contribuer à combler le déficit de connaissances.

Sommaire

Résumé	3
1. Introduction	6
2. La nanotechnologie dans le secteur de la construction.....	8
2.1 Facteurs influençant l'utilisation des nanoproducts dans la construction	9
Concurrence basée sur le prix.....	9
Performances techniques.....	9
Connaissances du secteur.....	10
Avantages de la nanotechnologie pour le secteur	12
Communication sur les <i>nano</i> tout au long de la chaîne d'utilisation.....	12
Fabricant de nanomatériaux – Fabricant de nanoproducts – Utilisateur final dans la construction – Propriétaire de la construction – Activités en rapport avec – l'entretien – le nettoyage – la rénovation – Travailleur du bâtiment – Traitement des déchets.....	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
Le « nano » se vend bien.....	15
2.2 Activités visant à garantir la sécurité au travail.....	15
3. Les nanoproducts sur chantier	16
3.1 Introduction	16
3.2 Ciment, béton et mortier humide	18
3.3 Revêtements et peintures.....	19
Peintures murales photocatalytiques, antibactériennes et autonettoyantes.....	20
Nanorevêtements pour surfaces en bois.....	20
Nanorevêtements pour le verre.....	21
3.4 La nanotechnologie et les infrastructures	22
3.5 Matériaux d'isolation	22
4. Risques pour la santé	24
4.1 Introduction	24
4.2 Voies d'exposition.....	25
Exposition par inhalation	25
4.3 Problèmes de santé et de sécurité posés par plusieurs nanoparticules	26
Profils de toxicité individuels.....	26
Risques liés à l'exposition professionnelle	27
4.4 Approches possibles pour utiliser les nanoproducts en toute sécurité	28
5. Autres mesures possibles pour renforcer la sûreté du lieu de travail	32
Résumé	3
1. Introduction	6
2. La nanotechnologie dans le secteur de la construction.....	8
2.1 Facteurs influençant l'utilisation des nanoproducts dans la construction	9
2.2 Activités visant à garantir la sécurité au travail.....	15
3. Les nanoproducts sur chantier	16
3.1 Introduction	16
3.2 Ciment, béton et mortier humide	18
3.3 Revêtements et peintures.....	19

3.4	La nanotechnologie et les infrastructures	22
3.5	Matériaux d'isolation	22
4.	Risques pour la santé	24
4.1	Introduction	24
4.2	Voies d'exposition.....	25
4.3	Problèmes de santé et de sécurité posés par plusieurs nanoparticules	26
4.4	Approches possibles pour utiliser les nanoproducts en toute sécurité	28
5.	Autres mesures possibles pour renforcer la sûreté du lieu de travail	32

1. Introduction

Dans le cadre du dialogue social européen, la FIEC (Fédération des industries européennes de la construction) et la FETBB (Fédération européenne des travailleurs du bâtiment et du bois) ont pris l'initiative de commander au bureau IVAM Uva BV une enquête sur l'état actuel des connaissances des parties prenantes et une vue d'ensemble des nanoproducts présents sur le marché européen de la construction. Le présent rapport de synthèse résume les résultats d'une étude approfondie sur l'état des connaissances en 2009 en ce qui concerne la disponibilité et l'utilisation des nanoproducts et les questions de santé et de sécurité qu'ils soulèvent dans le secteur européen de la construction. Le rapport principal « La nanotechnologie dans le secteur européen de la construction, état des connaissances en 2009 » décrit en détails les conclusions de cette étude.

En raison de la pression constante du marché en faveur de produits plus durables, plus renouvelables et moins chers, les produits destinés au secteur du bâtiment se prêtent à une recherche et un développement continus. La nanotechnologie est l'une des évolutions technologiques les plus récentes concernées par la R&D. Cette technologie permet d'observer, de surveiller et d'influencer des matériaux (et leur comportement) à une échelle nanométrique (nm), c'est-à-dire à une échelle de grandeur environ 10 000 fois plus petite que l'épaisseur d'un cheveu humain. Elle nécessite des techniques d'imagerie poussées pour étudier et améliorer le comportement des matériaux, mais aussi la conception et la production de poudres, de liquides ou de solides très fins contenant des particules d'une taille comprise entre 1 et 100 nm, que l'on appelle nanoparticules. Les entreprises utilisent ces nanoparticules pour donner à leurs produits des propriétés nouvelles ou améliorées – par exemple, des revêtements de fenêtres réfléchissant dans le domaine infrarouge pour une meilleure gestion de la température intérieure, des matériaux en béton ultra haute performance permettant des constructions plus fines et plus légères et des revêtements autonettoyants qui contribuent aussi à réduire la pollution organique de l'air.

Bien que l'internet regorge d'informations sur la nanotechnologie dans le bâtiment et que les perspectives d'avenir soient prometteuses, seul un nombre limité de nanoproducts se retrouve en réalité sur les chantiers à l'heure actuelle pour la bonne et simple raison que les techniques et les nanocomposants sont trop chers pour permettre la fabrication de produits capables de concurrencer les produits existants. D'après certains acteurs de premier plan du secteur, *« à cet égard, le secteur de la construction accuse un retard d'une dizaine d'années par rapport à l'ensemble de l'industrie, à cause des coûts en jeu et des normes techniques et de sécurité requises par les matériaux utilisés. »*

Malgré cela, il importe de noter leur abondance croissante. Les nanoproducts destinés à la construction présentent des caractéristiques uniques, mais ils peuvent en même temps comporter de nouveaux risques pour la santé et la sécurité du travailleur sur chantier. Vu le caractère récent des nanomatériaux et des nanoproducts en général, on commence à peine

à comprendre ces risques¹. Ajouté à cela les hautes espérances suscitées par le potentiel commercial que les nanoproducts devraient avoir dans un proche avenir², on saisit l'importance qu'il y a de suivre dès le départ les développements dans le domaine de la nanotechnologie et de prendre conscience des incertitudes relatives aux questions de santé et de sécurité posées par les nanomatériaux et les nanoproducts afin de prendre, le cas échéant, les mesures appropriées. Le présent rapport tente de jeter une lumière nouvelle sur les nanoproducts utilisés aujourd'hui dans le bâtiment et sur leurs caractéristiques de manière à faciliter une évaluation des risques qui soit mieux informée.

Lorsque l'on parle des nanomatériaux et des nanoproducts, il faut bien se rendre compte qu'aucune définition conventionnelle n'existe à l'heure actuelle et que des malentendus surgissent dès lors facilement. Le présent rapport considère :

1. un nanomatériau comme un matériau particulier contenant des nanoparticules ou des agglomérats ou agrégats de nanoparticules sous forme solide ou dispersés dans un liquide, ou des nanostructures internes ou externes ou des domaines nanométriques ;
2. un nanoproduct comme tout produit dans lequel un nanomatériau a été délibérément intégré pour influencer ses propriétés.

Les nanoparticules sont définies comme étant « manufacturées » (c'est-à-dire, faites de la main de l'homme, pour les distinguer des particules nanométriques « naturelles » qui se forment par exemple au cours d'éruptions volcaniques) à une échelle allant de 1 à 100 nm. Ces particules peuvent être solubles ou non. En ce moment, seules les particules non solubles correspondent au terme de nanoparticules parce que les particules non solubles persistantes sont celles qui présentent un intérêt majeur en raison de leurs effets potentiels sur la santé propres à leur caractère nanométrique. Toutefois, on discute actuellement des effets potentiels sur la santé des particules nanométriques solubles, notamment en raison de leur devenir dans l'environnement, qui est propre à leur nature nanométrique.

¹ Il existe plusieurs questions ouvertes liées aux risques pour la santé et à la cinétique d'exposition aux nanomatériaux et aux nanoproducts. D'un autre côté, les connaissances et les expériences actuelles dans le domaine de l'évaluation de la santé et de la sécurité au travail et de la gestion de l'exposition aux risques liés à l'exposition sont importantes. Utiliser ce que l'on connaît pour faire face à ce que l'on ne connaît pas : tel est le défi lancé par les nanoproducts.

² Voir par exemple www.hessen-nanotech.de.

2. La nanotechnologie dans le secteur de la construction

Trois pistes ont été explorées pour dégager une vue d'ensemble de la disponibilité et de l'utilisation actuelles des nanomatériaux et des nanoproduits sur les chantiers, mettre en lumière les évolutions en cours susceptibles de déboucher sur une utilisation des nanoproduits dans un avenir proche, et signaler et mettre en perspective les questions de santé et de sécurité au travail posées par le nanoproduit utilisé :

1. Toute une littérature (scientifique) et des recherches sur l'internet ont fourni la base des informations sur les nanomatériaux et les nanoproduits utilisés dans le secteur de la construction et sur les questions de santé au travail susceptibles de jouer un rôle dans leur application.
2. La FIEC et la FETBB ont mené une enquête auprès de leurs membres dans 24 pays européens afin d'évaluer le niveau de connaissance général des employeurs (représentants) et des employés sur les applications des nanoproduits dans le secteur (ci-après, « enquête 2009 »). L'enquête 2009 avait pour but de dégager une première impression des expériences sur le terrain, des raisons poussant à opter pour un nanoproduit et des questions de santé et de sécurité évoquées par le fournisseur des produits. Le but n'était en aucun cas de se faire une idée précise de l'utilisation actuelle des nanoproduits et de leur usage professionnel dans le secteur de la construction, ce qui nécessiterait une approche beaucoup plus complexe.
3. Des interviews approfondies de travailleurs de la construction et de leurs employeurs, d'architectes, de fabricants de produits et de chercheurs en matériaux et produits de construction ont été enregistrées pour permettre une vision plus précise des activités actuelles dans le secteur des nanoproduits destinées au secteur de la construction. Les conclusions de ces interviews ont permis de mettre en perspective les résultats de l'enquête 2009, la littérature et les informations glanées sur l'internet et de mettre en exergue les nanodéveloppements qui peuvent être actuellement qualifiés de plus importants pour le secteur de la construction.

Tableau 0-1 Aperçu du profil typique (fonction) des participants à l'enquête 2009 et des différentes organisations approchées pour les interviews approfondies

Répondants ³	Fonction	Interviews approfondies (%)	Type d'organisation
6	Employeur	21	Secteur de la construction
4	Peintre (travailleur, délégué des travailleurs)	21	Fabricant de produits (bruts)
4	Conseiller à la sécurité (travailleur, délégué des travailleurs)	9	Organisations sectorielles
3	Divers (travailleur, délégué des travailleurs)	4	Architectes
11	Non précisé (travailleur, délégué des travailleurs)	42	R&D universitaires

³ Au total, 28 réactions ont été reçues de 14 pays différents, plus celles de 38 experts néerlandais de la santé au travail qui sont traitées séparément.

38 ⁴	Conseillers à la santé et à la sécurité au travail/hygiénistes du travail (NL seulement)	
-----------------	------------------------------------------------------------------------------------------	--

Les informations qui en découlent sont présentées dans les sections ci-dessous. Le tableau 0-1 présente un aperçu du profil de fonction des personnes ayant répondu à l'enquête 2009 et du type d'organisations approchées pour réaliser les interviews approfondies.

2.1 Facteurs influençant l'utilisation des nanoproducts dans la construction

En 2003, des spécialistes en R&D ont manifesté de grands espoirs quant au développement, dans un avenir proche, de nanoproducts destinés au secteur de la construction. Or, seul un nombre limité des produits envisagés à l'époque sont parvenus aux chantiers d'aujourd'hui⁵. Il y a plusieurs raisons à cela, dont les plus importantes seront discutées dans les sections qui suivent.

Concurrence basée sur le prix

La toute première raison pour laquelle le succès des nanoproducts rencontré dans la société ne se vérifie pas aussi dans le secteur de la construction tient à leurs coûts. Actuellement, les nanomatériaux et, partant de là, les nanoproducts, restent nettement plus chers que les autres matériaux en raison de la technologie nécessaire pour les fabriquer. Pour le secteur de la construction, cela signifie que, dès la phase de R&D d'un produit, les initiatives sont arrêtées lorsque l'on prévoit que le nanoproduct ne pourra jamais être fabriqué à un prix concurrentiel. Cela s'explique dans une large mesure par le fait que les produits destinés à la construction sont presque toujours fabriqués en grandes quantités et qu'une petite différence de prix au kilo entraîne une augmentation énorme des coûts totaux, compte tenu du volume total de la construction.

Les fabricants de matériaux de construction rechignent par conséquent à développer des nanoproducts, et ceux qui sont développés ne sont utilisés qu'à la suite d'une demande spécifique. On le constate surtout dans le cas des produits fabriqués en grandes quantités, tels que le béton ou le mortier, et des revêtements de construction. Par contre, pour ce qui est par exemple des matériaux d'isolation et des revêtements architecturaux et de verre, l'importance que la société accorde actuellement à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le contexte des changements climatiques et de la réduction des gaz à effet de serre stimule leur pénétration du marché.

Performances techniques

Les performances techniques du produit constituent un deuxième facteur limitant l'introduction des nanoproducts à grande échelle. Ces performances doivent être pleinement attestées pour répondre aux normes techniques de ce matériau. Cela dépend évidemment du secteur ciblé. Ainsi, pour le béton, il s'agit là d'une question essentielle. Pour les revêtements de fenêtres autonettoyants, cet aspect est moins important, car les normes de sécurité sont beaucoup moins strictes.

⁴ Les réactions des hygiénistes du travail néerlandais et des conseillers à la santé et à la sécurité (38 répondants au total) avaient un caractère exceptionnel dans le cadre de l'enquête 2009. Ces réponses ont donc été évaluées séparément. Les résultats de cette évaluation étaient en tout point conforme aux résultats des autres réactions.

⁵ Bartos PJM 2009, Nanotechnology in Construction 3, Proceedings of the NICOM3. ISBN 978-3-642-00980-8

Connaissances du secteur

Les connaissances (ou l'absence de connaissances) constituent un autre élément clé qui entrave l'introduction des nanoproducts dans les travaux de construction. En l'absence d'informations, on ne sait tout simplement pas qu'il existe des innovations susceptibles d'être utilisées ou explorées. En Europe, les connaissances sur la nanotechnologie dans la construction sont très limitées et restent actuellement aux mains d'un nombre limité d'acteurs clés qui développent le marché. L'enquête 2009 réalisée par la FIEC et la FETBB pour évaluer le niveau de connaissances des travailleurs de la construction et de leurs employeurs a débouché sur l'illustration 0-1, qui montre que la majorité des répondants (~75 %) ignoraient s'ils travaillaient avec des nanoproducts. Ce résultat repose sur la réception de 28 questionnaires complétés, alors que l'objectif était d'obtenir trois réactions pour chaque membre de la FIEC ou de la FETBB dans chacun des 24 pays de l'UE couverts (objectif total de 144 réactions)⁶.

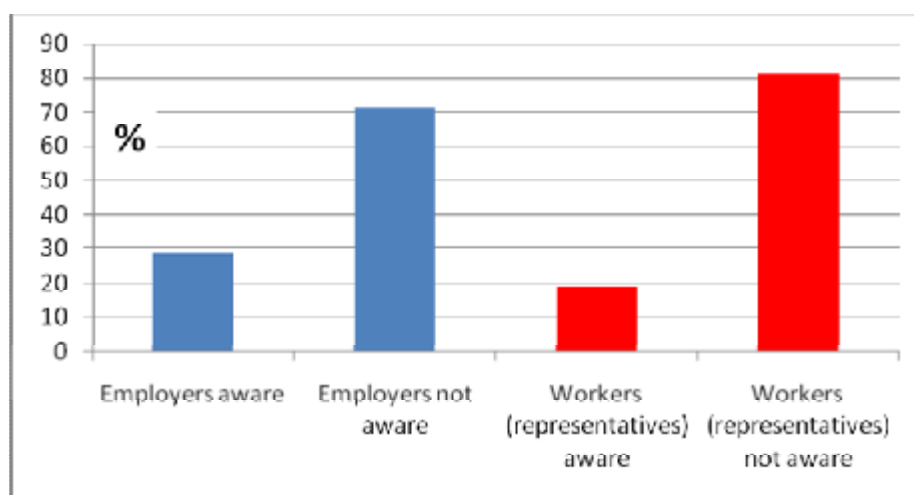


Illustration 0-1 Réaction à l'enquête 2009 des employeurs et des travailleurs (représentants) conscients ou non de la présence de nanoproducts sur leur lieu de travail.

Les résultats de l'enquête ne devraient toutefois être interprétés que comme une indication de l'état actuel des connaissances du secteur du bâtiment en ce qui concerne l'utilisation des nanoproducts dans ce secteur. En fait, il est probable que les 25 % des répondants qui se disent informés surestiment les chiffres réels en raison d'une sélection positive : ceux qui sont conscients de travailler avec des nanoproducts ne demandent qu'à réagir. Voici quelques commentaires reçus de la part des représentants des travailleurs de la construction et de leurs employeurs en réaction à l'enquête 2009 :

- « ...J'ai parlé de la question avec plusieurs entreprises et aucune d'entre elles n'a entendu parler de matériaux contenant ces produits. J'ai aussi parlé à plusieurs personnes de l'Agence pour la santé et la sécurité et elles aussi ne savent rien de l'existence de ces produits... (R.-U.) ».

⁶ Une réaction au questionnaire a été obtenue dans 14 pays différents avec en moyenne 1 à 2 réactions par pays, sauf pour les Pays-Bas. Le taux de réaction néerlandais beaucoup plus élevé est dû à un projet parallèle (au niveau national) portant sur les nanoproducts dans le secteur de la construction et l'exposition professionnelle qui leur est liée.

- « ...nous avons essayé d'obtenir des informations de plusieurs sous-secteurs de la construction, mais à ce jour, nous n'en avons pas reçu. Le problème est encore méconnu, et cela ne nous surprend pas beaucoup (CH) ».
- « ...la question est tout simplement trop abstraite et trop inconnue pour que l'on participe à l'enquête (NL) ».

Ces commentaires, conjugués aux conclusions des interviews approfondies menées auprès d'un certain nombre d'acteurs clés en parallèle à l'enquête 2009 (par exemple, BASF, Heidelberg Cement, Skanska), semblent indiquer que la nanotechnologie n'a pas encore pénétré de manière significative le secteur de la construction. Les contacts établis avec plusieurs PME confirment cette image de la nanotechnologie, qui ne serait qu'un marché de niche dans le secteur de la construction d'aujourd'hui. On trouve toutefois des indications en sens inverse chez un bureau de conseils en santé et en sécurité dans le secteur de la plomberie et de l'électricité au Danemark : « ...nous n'avons aucune information sur des nanoproduits qui seraient utilisés dans ces secteurs, mais nous sommes sûrs que certains des produits que nous rencontrons sont en fait des nanoproduits. »

Les participants à l'enquête 2009 qui travaillent avec des nanoproduits sont principalement en contact avec des produits à base de ciment ou de béton, des revêtements ou des matériaux d'isolation (voir Illustration 0-2). D'autres types de produits, notamment les produits pour le revêtement de chaussées, les matériaux ou textiles retardateurs de flammes, n'ont été indiqués que par certains d'entre eux. Tous les répondants utilisaient leurs nanoproduits pour des raisons de performance (qui excluaient un produit alternatif) et parfois aussi à la demande spécifique du client.

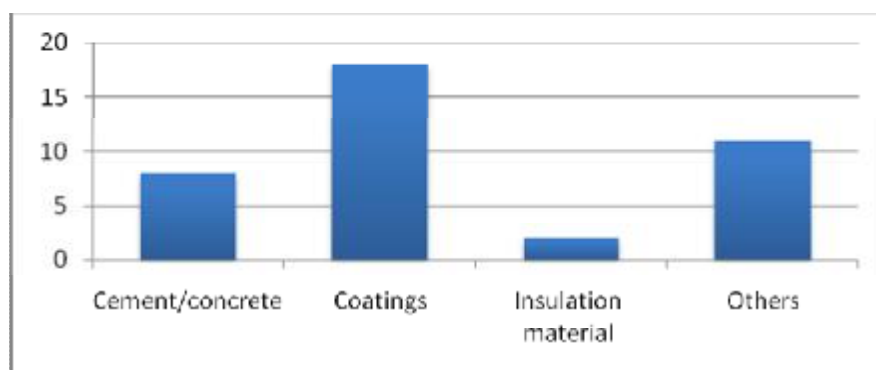


Illustration 0-2 Nanoproduits dont l'utilisation a été déclarée. Nombre de produits par type de produit, d'après les résultats de l'enquête 2009.

Fait intéressant, par contre, certains des participants qui ont répondu « *Non, je ne suis pas conscient de travailler avec des nanoproduits* » déclarent qu'il est possible qu'ils travaillent avec certains types de nanoproduits lorsqu'on leur soumet une liste spécifique de types de produits (~18 % de tous les répondants : travailleurs, délégués des travailleurs et employeurs). Les types de produits qui sont généralement identifiés par ces répondants recoupent les produits mentionnés nommément par les répondants conscients de travailler avec des nanoproduits (~21 % de tous les répondants : travailleurs, délégués des travailleurs et employeurs). Ces chiffres dénotent un manque de connaissances plus général quant à la nature des produits manipulés, mais ils pourraient aussi être interprétés comme s'ils

reflétaient les groupes de produits dans lesquels les répondants s'attendent surtout à voir apparaître des nanoproducts. Autre explication : les réactions pourraient être influencées par les campagnes de marketing qui associent des performances techniques supérieures au préfixe *nano*, suggérant que tous les produits « nouveaux », « uniques » ou « extra résistants » sont des nanoproducts présumés.

Avantages de la nanotechnologie pour le secteur

L'utilisation de la nanotechnologie en vue de l'étude et du développement de matériaux améliorés nécessite un département de R&D fort, ayant la possibilité d'utiliser des équipements onéreux manipulés par des personnes qualifiées. Or, comme le secteur de la construction n'a jamais été fortement porté sur la R&D, les activités de R&D dans le domaine nanométrique sont principalement menées par de grands producteurs internationaux tels que BASF, AKZO-NOBEL, DuPont, Heidelberg et Italcementi ou par des instituts de recherche spécialisés (universitaires ou privés). Cela implique indirectement que les PME jouent un rôle limité, voire inexistant, dans les activités novatrices actuelles liées aux nanomatériaux dans le secteur de la construction. Font exception les petites spin-off sous contrat leur permettant d'utiliser les équipements de recherche de leur société mère, plus grande, les PME créées dans le giron d'une université (et pouvant utiliser ses équipements), qui sont spécialisées dans certains marchés de niche spécifiques, comme la production et la conception à la demande de nanomatériaux spécifiques, ainsi qu'un nombre limité de PME qui ont réussi à exploiter les succès et les avancées de sociétés plus grandes pour développer leurs propres gammes de produits de manière innovante.

Cette situation est toutefois en train de changer dans le secteur du revêtement. En règle générale, les nanorevêtements sont déjà bien avancés dans leur développement en comparaison à d'autres produits de construction tels que le béton ou les matériaux d'isolation, et les méthodes d'application des nanomatériaux sont de plus en plus courantes chez les fabricants de produits. Dans le secteur de la peinture et des revêtements, les PME commencent donc à jouer aussi un rôle et à fabriquer leur propre gamme de nanoproducts.

Communication sur les *nano* tout au long de la chaîne d'utilisation

Un travailleur du bâtiment moyen n'accorde pas une importance prioritaire aux informations détaillées sur la composition chimique du produit avec lequel il travaille. En revanche, il a besoin d'informations techniques et d'informations sur la santé et la sécurité. C'est déjà le cas des produits « normaux », et les nanoproducts ne font pas exception sur ce point. L'utilisation de méthodes normalisées pour déterminer les risques professionnels pour la santé résultant d'une exposition à des nanoproducts est actuellement débattue, et plusieurs questions restent en suspens quant à l'applicabilité de ces méthodes. Une incertitude générale plane donc sur les risques pour la santé et la sécurité présentés par les nanoproducts, qui devraient être traités et utilisés avec une certaine précaution.

Les nanomatériaux peuvent être beaucoup plus réactifs (par gramme ou par matériau) que leurs correspondants conventionnels et peuvent avoir un comportement assez différent. Ils sont donc susceptibles d'avoir des effets différents sur la santé, potentiellement plus graves. Les limites de sécurité fixées, au-delà desquelles l'enregistrement et la communication des risques pour la santé et la sécurité sont exigés, peuvent dès lors être trop élevées pour garantir la sécurité du lieu de travail, et elles devraient être abaissées. L'ISE et la CES font

donc pression au niveau européen pour changer cette situation par un amendement au système REACH, qui imposerait la notification obligatoire de tous les nanomatériaux ajoutés intentionnellement à un produit.

Actuellement, la situation est telle que l'on ne peut prendre connaissance que de manière limitée des données chimiques d'un nanoproduct. Rares sont les fabricants de produits qui utilisent des composants nanométriques ou des nanomatériaux et qui en informent leurs clients parce que le règlement sur la classification, l'étiquetage et l'emballage de substances et de mélanges (CEE)⁷ ne les oblige pas à le faire. Les répondants à l'enquête 2009 déclarent n'être informés des caractéristiques du produit, via une fiche de données de sécurité (FDS), que pour 7 des 41 nanoproducts qu'ils disent utiliser, et parmi ceux-ci, la FDS ne prescrit que dans 4 cas des mesures de protection pour le nanoproduct qui diffèrent des mesures prescrites pour les produits conventionnels utilisés auparavant par la même entreprise de construction (voir Illustration 0-3). La réponse obtenue indique que, pour la majorité des produits, la communication relative aux aspects de santé et de sécurité du produit est insuffisante dans la chaîne d'utilisation (pour 34 des produits, il n'y a aucune FDS disponible, d'après le répondant, qui est soit un travailleur du bâtiment, soit un employeur). Pour les produits accompagnés d'une FDS, la présence éventuelle d'informations sur la santé et la sécurité, propres au nanocomposant, dépend du fabricant ou du fournisseur. Pour les produits cités par les participants à l'enquête 2009, la plupart des FDS ne font pas état de la présence d'un nanocomposant, alors que la fiche technique semble parfois indiquer clairement, parfois suggérer et parfois sembler suggérer (par exemple, à cause du nom du produit) que le produit contient au moins un nanomatériau. Les informations propres aux nanomatériaux fournies sur la fiche technique vont d'informations assez détaillées – indication de l'échelle de grandeur et image MEB⁸ de la nanoparticule ou description de la zone de surface active du nanomatériau par gramme – à une « simple » note selon laquelle le produit contient par exemple des nanoquartz (sans préciser outre mesure à quoi ce quartz ressemble).

Dans tous les cas où de plus amples informations sur le nanoproduct étaient fournies, les fabricants prétendaient que leur produit n'était pas dangereux s'il était utilisé comme prévu, et dans aucun cas, des compétences ou une formation spécifiques (aux nanomatériaux) n'étaient requise pour utiliser le nanoproduct correctement. Par ailleurs, pour la majorité des nanoproducts mentionnés dans l'enquête 2009, les mesures de protection prescrites étaient décrites comme n'étant « *pas différentes des mesures antérieures* », lorsqu'aucun nanoproduct n'était utilisé, et les pratiques de travail n'étaient prétendument pas influencées par leur utilisation. Des mesures plus protectrices que dans le cas des produits conventionnels n'ont été prescrites, pour une application similaire, que pour deux nanoproducts. En ce qui concerne l'enquête 2009, les produits concernés étaient deux produits cimenteux contenant des nanosilices. Certains éléments portaient toutefois à croire que les nanoproducts peuvent aussi faciliter le travail.

⁷ http://ec.europa.eu/environment/chemicals/dansub/home_en.htm ; version française du règlement (CE) n° 1272/2008: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:353:0001:1355:FR:PDF>

⁸ Microscopie électronique à balayage.

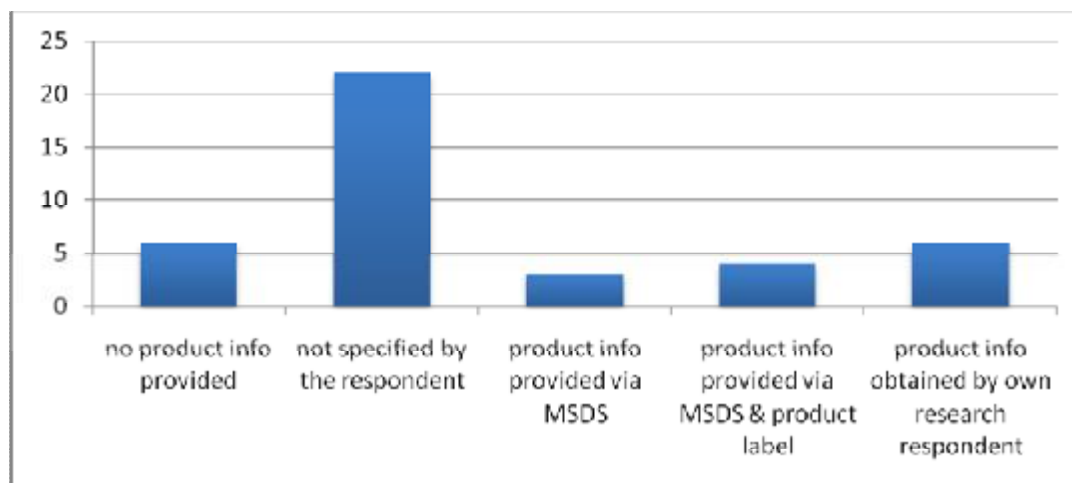


Illustration 0-3 Spécification des informations sur les nanoproducts dont l'utilisation a été déclarée dans l'enquête 2009 (en chiffres)

Actuellement, la chaîne d'information se présente en gros comme suit (voir aussi Illustration 0-4). Les producteurs de nanomatériaux « bruts » fournissent des informations sur les propriétés des matériaux (comme la réactivité, les caractéristiques spécifiques de leur comportement, la taille, la forme, la structure cristalline, la masse et la densité) et des spécifications sur les questions liées à la santé, la sécurité et l'environnement (pour autant qu'elles soient connues) à l'utilisateur suivant de la chaîne (la plupart du temps, le fabricant de produits). Selon les relations commerciales qu'ils entretiennent, ces données peuvent se résumer au minimum légal imposé ou être plus détaillées lorsque la confiance règne entre les deux partenaires. Toutefois, la fourniture d'informations propres aux nanomatériaux s'arrête normalement à ce stade-là de la chaîne. La plupart du temps, les fabricants de produits n'utilisent les nanomatériaux que comme un additif, au-dessous de la concentration à partir de laquelle l'enregistrement et la communication deviennent obligatoires. Seuls certains de ces producteurs informent leurs clients, bien qu'ils se limitent parfois à utiliser des caractéristiques indiquant que le produit a été « *produit au moyen d'une nanotechnologie* », sans rentrer dans les détails. Quant au client, il n'a qu'à deviner en quoi consiste réellement ce nanoproduct.

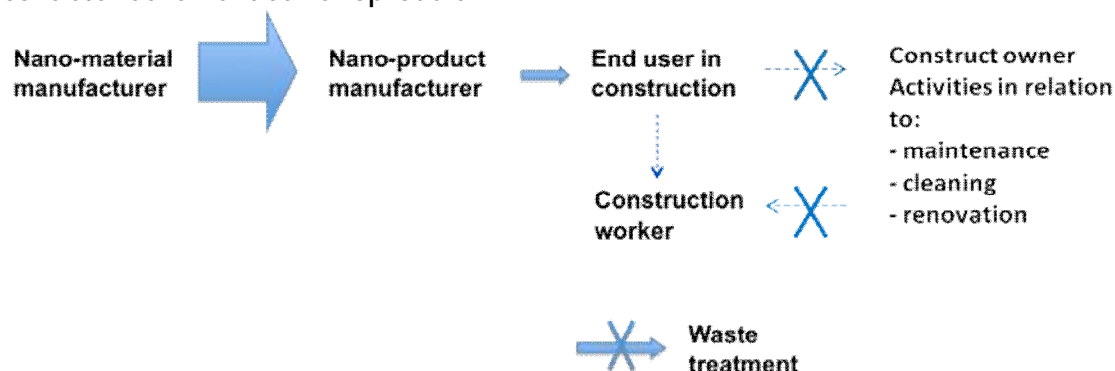


Illustration 0-4 Intensité de la fourniture d'informations propres aux nanomatériaux tout au long de la chaîne d'utilisation, du fournisseur de matériaux bruts au traitement des déchets. La largeur de la flèche indique grosso modo le volume d'informations propres aux nanomatériaux fournies à l'utilisateur suivant de la chaîne.

Le « nano » se vend bien

La nanotechnologie et les produits auxquels elle donne lieu sont envisagés pour résoudre les problèmes d'une actualité brûlante tels que la diminution des ressources minérales, la pollution de l'environnement, la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effets de serre, et même des problèmes de sécurité tels que les attentats terroristes et la paix dans le monde. Ces hautes espérances expliquent que le préfixe *nano* soit devenu synonyme de mots clés tels que *succès*, *hautes performances* et *développement durable*. Par conséquent, les entreprises, mais aussi les chercheurs, ont commencé à vendre leurs produits ou leurs travaux sous le vocable de *nano* afin d'attirer les clients ou les subsides. Cette tendance a commencé il y a 10 à 15 ans et aujourd'hui encore, alors qu'elle fait son retour en raison des préoccupations en matière de santé et de sécurité mais aussi de la pression des organisations sectorielles visant à éviter toute confusion sur la question⁹, le *nano* est utilisé pour souligner les hautes performances techniques ou la conception subtile et intelligente d'un produit.

Les produits qui contiennent des nanomatériaux ne sont pas les seuls concernés. Des produits assez courants contenant des enzymes (dont la taille est de l'ordre du nanométrique) ou des dispersions huileuses (contenant des gouttelettes d'huile d'un diamètre nanométrique) ont été qualifiés de *nano*. Ou encore, des produits qui peuvent être considérés comme des cas limites, dont les matériaux précurseurs sont produits à partir de nanomatériaux ou de processus de nano production, mais dont les composants réels ne sont plus des nanomatériaux. La situation qui découle de tout cela prête à confusion : des nanoproduits sont parfois vendus en tant que produits conventionnels, mais le contraire se produit aussi, à savoir que des produits conventionnels sont parfois vendus en tant que nanoproduits.

2.2 Activités visant à garantir la sécurité au travail

Malgré ce qui précède, les fabricants de nanoproduits prennent de plus en plus conscience des problèmes potentiels de santé et de sécurité, largement méconnus, posés par l'utilisation et la manipulation de nanoparticules. Sur chantier, les travailleurs peuvent être exposés à des nanoparticules de deux manières différentes :

1. par l'utilisation primaire d'un nanoproduit, lorsqu'ils travaillent avec un nanoproduit (un produit prêt à l'utilisation ou un produit à plusieurs composants, mélangé sur chantier) ;
2. par l'utilisation secondaire d'un nanoproduit, lorsqu'ils usinent un nanoproduit (par exemple, forage, ponçage ou nettoyage).

Une évaluation minutieuse des risques est nécessaire, surtout lorsque ces activités impliquent la manipulation de matériaux sous forme de poussière ou liquide. Exemples typiques : pulvérisation d'un nanorevêtement, ajout de fumées de silice à du mortier humide, ponçage d'une façade de béton photoactif ou nettoyage d'un mur antibactérien (contenant de l'argent). D'un autre côté, les risques liés à l'exposition aux nanoparticules par la manipulation de nanoproduits solides (préfabriqués) tels que la céramique, le verre, l'acier, le plastique, les matériaux composites, les matériaux d'isolation, le béton ou le bois renforcés aux nanomatériaux, sans les usiner de quelque manière que ce soit, seront limités (voire inexistantes) parce que les nanoparticules sont censées rester contenues dans la

⁹ Communications privées avec plusieurs entreprises produisant différents types de matériaux.

matrice solide. Par contre, l'exposition peut se produire lorsque le matériau s'use ou lorsque la construction est rénovée ou démolie.

Pour rendre le lieu de travail sûr, plusieurs organisations, notamment d'importants fabricants de matériaux et la Commission européenne, conseillent dans un premier temps d'adopter une démarche de précaution. Suite à l'importance constante accordée à la démarche de précaution préconisée à travers les différents codes de conduite et soutenue par la Commission européenne et les grandes industries concernées telles que BASF et Dupont, les nanoparticules et les nanomatériaux sont produits dans une large mesure sous forme liquide (suspension ou solution), sous pression ou sous scellé afin de maximaliser le contrôle des particules et de réduire le plus possible les risques d'exposition. Pour ces raisons, et contrairement à ce qui se faisait il y a quelques années, les additifs nanométriques sont fournis la plupart du temps en suspension ou solution prête à être utilisée par le fabricant de produits. Lorsque cela n'est pas possible, par exemple, dans le cas des fumées de silice pour le béton BUHP, et lorsque les additifs doivent rester sous forme de poudre, d'autres solutions sont mises en œuvre pour éviter l'exposition, comme l'utilisation de matériaux de conditionnement (sacs volumineux) solubles dans l'eau et n'affectant pas les caractéristiques attendues du produit (béton).

Il reste toutefois très difficile de déterminer si une pratique de travail donnée et les mesures de protection prises suffisent pour travailler en toute sécurité. Les appareils de mesure utilisés pour déterminer l'exposition réelle sur le lieu de travail sont très onéreux et difficiles à manier et n'apportent qu'une réponse parcellaire à la question des niveaux d'exposition réels. D'après ce que l'on sait actuellement, il existe divers types de matériaux de protection personnelle sur le marché, qui permettent de se protéger contre l'exposition aux nanoparticules. On trouvera des informations sur les matériaux de protection personnelle dans une étude publiée récemment par l'OCDE, qui présente une vue d'ensemble comparative des conseils permettant de sélectionner les équipements de protection de la peau et les respirateurs afin de préserver les travailleurs contre l'exposition aux nanomatériaux manufacturés¹⁰.

3. Les nanoproducts sur chantier

3.1 Introduction

La part de marché totale des nanoproducts dans le secteur de la construction est faible. On considère que les nanoproducts ne sont appliqués que dans les marchés de niche¹¹. Cette part de marché devrait toutefois augmenter dans un proche avenir¹². On s'attend à ce que les nanoparticules jouent un rôle important à la base de la conception, du développement et de la production de matériaux destinés au secteur du bâtiment¹³. En principe, on peut d'ores

¹⁰ OECD Environment, Health and Safety Publications Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials No. 12 (2009) ENV/JM/MONO(2009)17

¹¹ Communication personnelle.

¹² Elle devrait passer de 20 millions USD en 2007 à ~ 400 millions USD avant la fin 2017. Freedonia Group Inc. *Nanotechnology in Construction* –Pub ID: FG1495107; 1^{er} mai 2007

¹³ Nanotechnology and Construction 2006; www.hessen-nanotech.de

et déjà trouver des nanoproduits dans presque tous les coins d'une maison ou d'un bâtiment moyen (voir Illustration 0-5).

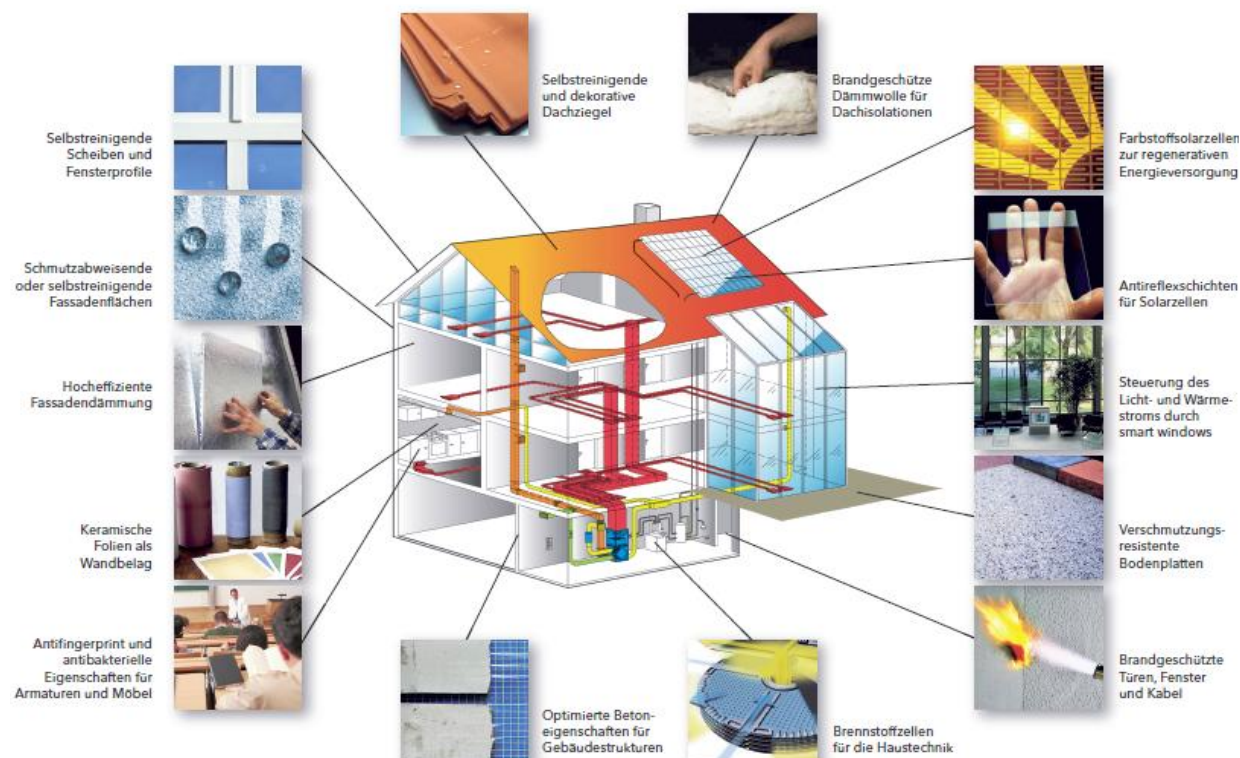


Illustration 0-5 Schéma d'une maison typique d'aujourd'hui indiquant où les nanoproduits sont susceptibles de se trouver¹⁴.

Les nanoproduits cités dans les réponses à l'enquête 2009 sont principalement le ciment et le béton, les revêtements et les matériaux d'isolation. Ces produits correspondent bien aux types de produits mis en évidence pendant les interviews approfondies, dont il ressort que les revêtements et les matériaux à base de ciment ou de béton représentent probablement la catégorie de nanoproduits la plus importante, suivie par les matériaux d'isolation, dans le secteur du bâtiment d'aujourd'hui. Ces données étaient aussi conformes aux conclusions d'une étude détaillée de la littérature, réalisée pour les besoins du présent rapport. Par conséquent, le ciment et le béton, les revêtements et les matériaux d'isolation ont fait l'objet d'une attention prioritaire. Dans ce contexte, les nanoparticules les plus mentionnées sont les polymères carbonés fluorés (CF-), le dioxyde de titane (TiO_2), l'oxyde de zinc (ZnO), la silice (ou fumées de silice, SiO_2), l'argent (Ag) et l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). À noter aussi qu'il n'existe aucune preuve de l'utilisation de nanotubes de carbone dans ces produits, même si de nombreuses publications attestent une recherche et un développement de produit allant dans ce sens.

Les polymères carbonés fluorés (polymères CF) sont des molécules de type Teflon apposées sur une surface pour la rendre hydrophobe et lyophobe. Les applications typiques se trouvent sur le verre. Le dioxyde de titane (TiO_2) absorbe la lumière ultraviolette et est utilisé comme couche protectrice contre la dégradation due aux UV. Certaines formes de TiO_2 sont photocatalytiques et catalysent la dégradation des

¹⁴ Tiré de la brochure : « Einsatz von Nanotechnologien in Architektur und Bauwesen », publiée par HA Hessen Agentur 2007, sources: Schrag GmbH VDI TZ.

polluants organiques tels que les algues, les HAP, le formaldéhyde et le NOx sous l'effet de la lumière ultraviolette. On trouve des applications pour pratiquement tout type de surface qui doit être protégée des UV, être autonettoyante ou contribuer à la réduction de la pollution atmosphérique.

L'oxyde de zinc (ZnO) présente des caractéristiques photoactives similaires au TiO₂ et peut être utilisé pour des applications semblables.

Les fumées de silice (SiO₂ amorphe) condensent le béton, le rendant ainsi plus résistant et plus durable dans des conditions alcalines telles que les environnements marins. Elles peuvent aussi être ajoutées au béton pour stabiliser les charges telles que les cendres volantes sur un matériau de revêtement pour donner une matrice très résistante, ou utilisées comme agent ignifuge. Les applications typiques sont le BUHP (béton à ultra hautes performances), les revêtements résistant aux rayures et le verre résistant au feu.

L'argent (Ag) agit comme bactéricide et peut être ajouté à toutes sortes de matériaux. Dans la construction, on le retrouve généralement dans les revêtements. En fait, l'action antibactérienne est due à l'ion argent, qui se forme lorsque l'Ag se dissout dans l'eau.

L'oxyde d'aluminium (Al₂O₃) est utilisé dans les revêtements pour interagir avec le liant et pour leur donner une résistance élevée aux rayures.

3.2 Ciment, béton et mortier humide

Pour le béton, la combinaison d'une bonne performance déjà existante et disponible à faible coût représente un grand défi pour toute application réussie de la nanotechnologie¹⁵. Un des domaines dans lesquels la nanotechnologie s'avère extrêmement utile aujourd'hui et dans un proche avenir est la meilleure compréhension et l'optimisation des propriétés des matériaux¹⁶.

L'utilisation des nanoparticules dans les matériaux à base de ciment et de béton se concentre sur le TiO₂ et les fumées de silice. Ces deux additifs sont toutefois utilisés en petites quantités ou en deux couches, et uniquement lorsqu'ils sont particulièrement nécessaires pour des raisons liées à leurs performances, à cause des coûts en jeu. Parmi les exemples de produits à base de fumées de silice actuellement sur le marché, citons, entre autres, le ChronoliaTM, l'AgiliaTM et le DuctalTM de Lafarge et l'EMACO®Nanocrete de BASF¹⁷. Parmi les exemples de ciment, citons le TioCem TX Active (Heidelberg Cement¹⁸), le NanoGuardStone-Protect de Nanogate AG¹⁹ et le TX Arca et le TX Aria (Italcementi), qui sont produits comme liants pour une large gamme de matériaux de revêtement tels que les murs extérieurs, les tunnels, les sols en béton, les pavés, les carreaux, les tuiles, la peinture de signalisation routière, les panneaux en béton, le plâtre et les peintures cimentaires²⁰.

¹⁵ NICOM3, compte rendu de conférence, 2009.

¹⁶ Diverses présentations et communication privée avec plusieurs entreprises et chercheurs universitaires à NICOM3, Prague 2009

¹⁷ D'après leurs informations, le matériau initial était en fait des fumées de silice, mais agglomérées en particules plus larges pendant le processus de production.

¹⁸ D'après leurs informations, le TiO₂ de ce produit n'est pas nanométrique mais un peu plus grand, de l'ordre du micron.

¹⁹ <http://www.nanogate.de/en/>

²⁰ <http://www.italcementigroup.com/ENG/Italcementi+Group/>



Illustration 0-6 À gauche : la gamme EMACO® Nanocrete. À droite : l'église du Jubilé, à Rome, un des succès les plus souvent cités de béton photocatalytique par ajout de TiO_2 . Matériau : TX Active (TX Arca) du groupe Italcementi.

Aucune indication n'a été trouvée quant à l'utilisation réelle de béton renforcé aux nanotubes de carbone. Les raisons invoquées tiennent au coût élevé de ces nanotubes et à la difficulté de les disperser dans une matrice. L'étude des possibilités d'application des nanotubes de carbone au béton est toutefois un domaine de recherche actif.

En raison des exigences strictes de qualité, le développement de matériaux dure généralement de cinq à dix ans. Des développements sont attendus dans un proche avenir dans le domaine des fumées de silice pour stabiliser le béton contenant d'importantes quantités d'agréats de béton recyclé¹⁵ et des additifs encapsulés pour optimiser le processus de durcissement.

3.3 Revêtements et peintures

Parmi tous les nanoproduits introduits dans le secteur de la construction, les revêtements et les peintures sont sans doute les produits qui ont le mieux pénétré le marché : « *Si tant est qu'il faille trouver un nanoproduit sur un chantier de construction moyen, la probabilité de le trouver dans des peintures ou des revêtements est de loin la plus forte* »^{21, 22}. Les revêtements décoratifs sont très fréquents, mais on a également trouvé des revêtements de construction à haute performance, tels que des revêtements de sol industriels. La nanotechnologie perce dans le domaine des peintures et des revêtements pour les raisons suivantes :

1. les nanoparticules interagissent mieux avec la surface sous-jacente que leurs formes plus grandes, par une pénétration plus profonde, une couverture renforcée ou une interaction accrue entre le revêtement et la surface, ce qui donne une couverture de surface plus durable ;
2. les nanoparticules sont transparentes à la lumière visible ;
3. la transparence ouvre la voie à des additifs novateurs conférant de nouvelles caractéristiques à des revêtements qui, autrement, ne seraient pas transparents, tels que la résistance élevée aux rayures ou aux UV, l'absorption ou la réflexion des infrarouges, la résistance au feu, la conductivité électrique ou les propriétés antibactériennes ou autonettoyantes.

²¹ Communication personnelle

²² <http://www.soci.org/Chemistry-and-Industry/Cnl-Data/2009/16/Nanocoatings-incognito>

Toutes ces considérations interviennent dans le développement de nouveaux systèmes de revêtement pour presque toute surface possible et imaginable, du plastique à l'acier. Dans le groupe de produits des nanorevêtements, l'accent est mis sur les revêtements antibactériens (ajout de TiO_2 , ZnO ou Ag), les revêtements « *autonettoyants* » photocatalytiques (TiO_2 ou ZnO), les revêtements réfléchissant ou absorbant les UV et les IR (TiO_2 ou ZnO), les revêtements retardateurs de flamme (SiO_2) et les revêtements résistant aux rayures (SiO_2 ou Al_2O_3). Ces types de fonctionnalités s'appliquent généralement aux revêtements pour murs (intérieurs ou extérieurs), aux façades en bois, au verre et aux différents matériaux pour le revêtement de chaussées.

Peintures murales photocatalytiques, antibactériennes et autonettoyantes

La plupart des peintures murales nano sont commercialisées pour leurs propriétés photocatalytiques, antibactériennes ou autonettoyantes. Parmi les exemples de revêtements autonettoyants et photocatalytiques, citons l'Arctic Snow Professional Interior Paint d'Arctic paint LTD (TiO_2), le Cloucryl d'Alfred Clouth Lack-fabrik GmbH&Co KG²³ (ZnO) et l'Amphisilan de Caparol²⁴. Exemple de revêtement antibactérien à base de nano-Ag : le Bioni Hygienic de Bioni CS GmbH (voir aussi Illustration 0-7)²⁵. Le Fluowet ETC100 (à base de polymères carbonés fluorés) de Clariant est un revêtement hydrofuge et lyophobe facile à nettoyer.



Illustration 0-7 Peinture murale antimicrobienne contenant des particules d'argent nanométriques à utiliser dans les cliniques et les hôpitaux.

Nanorevêtements pour surfaces en bois

Les nanorevêtements pour les produits du bois sont conçus pour les murs et les façades (extérieur), mais aussi pour les parquets et les meubles (intérieur). Ils se concentrent sur la résistance à l'eau (et dans une moindre mesure la résistance aux matières grasses), la résistance aux rayures et la protection contre les UV. Bien qu'il existe plusieurs produits sur le marché, la durabilité des revêtements censés protéger contre l'eau et les UV, en particulier, suscite un certain scepticisme en raison de la qualité de certains produits de la première génération²⁶. Par conséquent, les revêtements de la nouvelle génération ont du mal à s'imposer, et rares sont les exemples d'applications effectives sur les chantiers.

« BYK Additives and Instruments »²⁷ est un exemple d'entreprise vantant une nouvelle génération de revêtements de protection contre les UV. Ceux-ci peuvent être basés sur des

²³ http://www.clou.de/frontend_live/start.cfm

²⁴ Contient du TiO_2 microscopique pour des raisons de coût, mais du nano- SiO_2 pour obtenir une résistance élevée aux rayures.

²⁵ <http://www.bioni.de/index.php?lang=en>

²⁶ Communication personnelle avec plusieurs fabricants de revêtement et personnes issues du secteur du bois.

²⁷ <http://www.byk.com>

absorbeurs d'UV organiques²⁸ ou sur les oxydes métalliques ZnO et CeO₂. Le TiO₂ est moins utilisé pour des raisons de transparence et d'activité photocatalytique.

Parmi les exemples de laques pour bois à haute résistance aux rayures qui contiennent du nano-SiO₂, citons le Bindzil CC30 (Baril Coatings), le Nanobyk 3650 (BYK Additives and Instruments) et le Pall-X Nano (Pallmann). Le Nanobyk 3600 (BYK Additives and Instruments) est un exemple de revêtement très résistant aux rayures basé sur l'ajout de particules nanométriques d'Al₂O₃.

À la différence des facteurs externes d'usure tels que les UV ou les rayures, une partie des propriétés du bois est due à l'exsudation de substances chimiques complexes, comme les tanins, qui, avec le temps, décolorent la surface du bois. On peut retarder ce processus en traitant les surfaces en bois à l'aide d'une couche de nano-argile (par ex. l'Hydrotalcite Mg₄Al₂(OH)₁₂CO₃.H₂O; le Nuplex). Les produits de cette gamme sont également fabriqués par BYK.

Les nanorevêtements qui protègent le bois contre l'eau ou les matières grasses sont par exemple le 2937 GORI Professional Transparent, commercialisé par Dyrup Denmark²⁹, le Percenta Nano Wood & Stone Sealant³⁰ (protection des matériaux en bois ou en pierre contre l'eau et les matières grasses, en général à base de polymères carbonés fluorés), le Pro-Sil 80 de NanoCer³¹ et le Nanowood de Nanoprotect³². Toutefois, certains de ces revêtements sont à base de « *micelles* » nanométriques de matière grasse dans l'eau. Si elles sont produites grâce à la nanotechnologie, les micelles ne devraient pas pour autant être considérées comme des nanoparticules, et par conséquent, ces revêtements ne devraient pas être qualifiés de nanorevêtements.

Nanorevêtements pour le verre

Outre les revêtements autonettoyants, photocatalytiques, résistant à la chaleur, antireflet et anticondensation pour le verre, on note des développements intéressants dans le domaine du contrôle du climat intérieur (blocage de la lumière infrarouge et de la lumière visible). On trouve à la fois des solutions (ré)actives et passives. Les solutions passives se présentent sous la forme de fines pellicules agissant en permanence³³. Les solutions de contrôle actif du climat intérieur ont recours aux technologies thermochromiques, photochromiques ou électrochromiques, qui réagissent à la température, à l'intensité lumineuse ou à la tension appliquée, respectivement, en modifiant leur niveau d'absorption de la lumière infrarouge de manière à conserver la fraîcheur du bâtiment. Ce dernier système est le seul à pouvoir être réglé manuellement. En mettant le verre sous tension par simple contact avec une sorte d'interrupteur d'éclairage, une couche d'oxyde de tungstène appliquée à la surface du verre devient plus opaque et absorbe donc davantage la lumière infrarouge (voir Illustration 0-8).

²⁸ Par ex. hydroxyphenylbenzotriazoles, hydroxybenzophenones, hydroxyphenyl-S-thiazines ou anilides oxalique.

²⁹ www.dyrup.com

³⁰ <http://en.percenta.com/nanotechnology-wood-stone-sealing.php>

³¹ <http://www.intelcoats.com/nanop%20Indnanocer%20engl.html>

³² <http://www.nanoprotect.co.uk/wood-protection.html>

³³ Exemples d'entreprises qui en font la publicité : Econtrol®-Glas GmbH & Co, 3M et Saint-Gobain.



Illustration 0-8 (À gauche) Les façades en verre de bâtiments forment un large champ d'application des innovations nanotechnologiques dans le secteur de la construction. (À droite) Verre électrochromique.

3.4 La nanotechnologie et les infrastructures

Dans le domaine de la durabilité et de la maîtrise de la pollution environnementale, la R&D étudie la possibilité de réduire la pollution atmosphérique due aux gaz d'échappement grâce à une infrastructure activée au TiO_2 . À cette fin, des produits ont été mis au point, tels que les pavés en béton NOxer^{®34} et le KonwéClear³⁵, un revêtement en asphalte cimenteux (voir Illustration 0-9). Plusieurs sociétés telles que Italcementi et Heidelberg Cement produisent toutefois des matériaux présentant cette propriété sous la forme de briques, de pavés, de panneaux, de carreaux et de murs du son.



Illustration 0-9 De gauche à droite : un trottoir au Japon constitué de pavés NOxer[®], pavés TX Aria, revêtement d'un tunnel (Italcementi) et route au KonwéClear (*Bouwend Nederland Podium 22*, 14 déc. 2006).

3.5 Matériaux d'isolation

Parmi les nanoproduits utilisés dans le secteur de la construction, les matériaux d'isolation sont en quelque sorte extraordinaires dans la mesure où souvent, ils ne contiennent pas de nanoparticules, mais sont réalisés à base de nanomousse (ou aérogel) de nanobulles ou de nanotrous. Cette différence est très importante, surtout du point de vue de la santé au travail, car elle suggère que le fait de travailler avec ces matériaux ne présente pas de risques pour la santé *liés aux nanomatériaux*.

Les matériaux d'isolation nanoporeux tels que les aérogels et certaines nanomousses aux polymères peuvent être de deux à huit fois plus efficaces que les matériaux d'isolation traditionnels (Illustration 0-10). Les aérogels d'isolation thermique que l'on trouve actuellement sont généralement à base de silice ou de carbone, et environ 96 % de leur masse est constituée d'air³⁶. Exemple : la couverture isolante au gel nanoporeux Insulair[®]

³⁴ <http://www.eurovia.com/en/produit/136.aspx>

³⁵ <http://hbo-kennisbank.uvt.nl/cgi/av/show.cgi?fid=3698>

³⁶ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Aerogel>

d'Insulcon B.V.³⁷ (Illustration 0-10), qui est souple et conçue spécialement pour être appliquée à des températures extrêmes.



Illustration 0-10 De gauche à droite : isolation améliorée par des matériaux à base d'aérogel ; aérogel : nanopores évacuées dans une matrice au SiO₂³⁸ ; couverture isolante nanoporeuse flexible d'Insulcon B.V. (2x).

Les autres produits dans ce domaine sont entre autres le Roof Acryl Nanotech (à base d'un liant au polyuréthane fluor nanostructuré, combiné à une couche supérieure d'oxyde de fer photocatalytique)³⁹ de BASF et le Relius Benelux pour protéger les toits de la chaleur et du froid, le PCI Silent de BASF pour l'isolation acoustique, le Spaceloft (spécialement conçu pour le secteur du bâtiment) et le Pyrogel XT d'Aspen Aerogels⁴⁰ à base d'une structure de silice nanoporeuse, le Pyrogel XTF et le Pyrogel 2250 d'Aspen Aerogels basés sur une structure de silice nanoporeuse spécialement conçue pour assurer une protection exceptionnelle contre le feu, le Cryogel Z d'Aspen Aerogels basé sur une structure de silice nanoporeuse spécialement conçue pour assurer une isolation exceptionnelle contre le froid.

³⁷ http://www.insulcon.com/page/products/Microporous_and_Nanoporous_products.htm

³⁸ <http://www.spaceflightnow.com>

³⁹ <http://www.relius.nl/ViewDocument.asp?DocumentId=419&MenuId=90&MenuLabel=News>

⁴⁰ <http://www.aerogel.com/>

4. Risques pour la santé

4.1 Introduction

Les preuves selon lesquelles les nanomatériaux pourraient avoir un comportement plus dangereux pour les êtres humains que leurs équivalents microscopiques s'accumulent. Il convient toutefois de souligner que cette information doit être prise au conditionnel, étant donné qu'à l'heure actuelle (2009), nos connaissances trop limitées ne nous permettent pas de généraliser. Il est dès lors conseillé d'adopter une démarche de précaution pour travailler avec ces matériaux. Les deux facteurs influençant la toxicité des nanomatériaux sont leur *taille* et leur *forme*.

Du fait des petites dimensions des nanoparticules (qu'elles soient bidimensionnelles – nanotiges – ou tridimensionnelles – nanoparticules), leurs propriétés électroniques se comportent différemment, ce qui se manifeste par leur réactivité chimique, plus agressive vis-à-vis du fonctionnement normal du corps humain. Ainsi, plusieurs nanomatériaux étudiés provoquent des effets inflammatoires plus prononcés (par un mécanisme appelé stress oxydatif), ils s'agglomèrent ou se lient plus facilement à certaines parties du corps humain, en les empêchant de fonctionner correctement. En outre, en raison de leur petite taille, leur surface est relativement grande par rapport à leur volume particulaire (et à leur masse), ce qui les rend nettement plus réactifs par unité de masse. Pour ne prendre que quelques exemples :

- Les nanoparticules peuvent être si petites qu'elles se comportent comme des gaz.
- Les nanoparticules peuvent être si petites qu'elles pénètrent plus profondément dans les poumons et qu'elles peuvent être plus facilement absorbées dans le courant sanguin.
- Contrairement à la plupart des autres substances chimiques, elles peuvent être absorbées par le nerf olfactif et être « facilement » transportées jusqu'au cerveau humain⁴¹.
- Certaines nanoparticules sont capables de traverser le placenta et d'atteindre le fœtus⁴².
- À cause de leur taille et de leurs propriétés de surface, elles peuvent atteindre des endroits (cellules, organes) du corps humain qui étaient jusqu'à présent bien protégées contre l'invasion des formes plus grandes.
- À cause de leur taille et de leurs caractéristiques de surface, elles pénètrent plus facilement la peau humaine que leurs formes plus grandes, notamment lorsque la peau est légèrement endommagée (abîmée, sèche, brûlée par le soleil ou écorchée).

Outre la taille, la forme spécifique des nanoparticules joue aussi un rôle clé dans le comportement toxique des matériaux. Par exemple, alors que des particules peuvent être relativement non toxiques, les nanotiges peuvent se comporter comme de véritables aiguilles qui perforent les tissus humains. On constate toutefois aussi le contraire : des

⁴¹ Oberdorster G et al. 2004, Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhalation Toxicology* 16 (6-7): 437-445

⁴² Hagens WI et al. 2007, What do we (need to) know about the kinetic properties of nanoparticles in the body? *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 49: 217-229

nanoparticules sont capables de surmonter les barrières humaines spécifiques en raison de leur forme et de leurs caractéristiques de surface.

Les autres facteurs dont il a été prouvé qu'ils jouent un rôle important pour déterminer les risques pour la santé propres aux nanomatériaux sont l'état d'aggrégation et d'agglomération du matériau et sa morphologie (amorphe ou cristalline) qui influencent la probabilité réelle d'être exposé au matériau nanométrique et l'intensité du risque potentiel présenté par ce matériau, respectivement. Quels que soient leurs risques intrinsèques, la probabilité d'exposition constitue toutefois l'élément essentiel de tout risque pour la santé présenté par des nanomatériaux ou des nanoproducts.

4.2 Voies d'exposition

Pour ce qui est de l'exposition aux nanoparticules, il convient de préciser que les travailleurs du bâtiment seront exposés en premier lieu (sans aucune exception) aux nanoproducts, ce qui a une influence sur l'exposition réelle des travailleurs aux nanoparticules contenues dans les produits. Ainsi, lorsqu'un travailleur inhale de la poussière contenant des nanoparticules, les doses réelles de nanoparticules auxquelles il est exposé dépendent de la solubilité de la poussière. Si la poussière est insoluble, une partie des nanoparticules restera logée dans la matrice et l'exposition se limitera aux nanoparticules présentes sur la surface du grain de poussière. Par contre, si la poussière est soluble, l'exposition concernera la totalité des nanoparticules contenues dans le grain de poussière.

De par la nature même des activités quotidiennes des travailleurs du bâtiment et des produits avec lesquels ils travaillent habituellement, l'exposition par inhalation de poussières générant des nanomatériaux (du fait de la découpe, du ponçage, du forage ou de l'usinage) ou d'aérosols provenant de la peinture au pistolet est la plus susceptible de présenter des risques pour la santé. La pénétration cutanée peut aussi jouer un rôle (bien que beaucoup plus faible) et poser problème lorsque de grandes parties du corps sont dénudées⁴³. L'exposition par ingestion primaire ne devrait pas poser problème tant que les mesures d'hygiène personnelle sont respectées. L'exposition par ingestion secondaire (résultant d'une inhalation de nanomatériaux due aux mécanismes de nettoyage naturels des voies respiratoires) constitue toutefois un risque en cas d'inhalation.

Exposition par inhalation

En règle générale, pour ce qui est de l'inhalation de poussières et d'aérosols, plus les particules sont petites, plus elles peuvent pénétrer profondément dans les poumons avant de se déposer, et plus leurs effets sur la santé sont potentiellement graves. Les effets typiques sur la santé qui ont été observés sont (NEAA 2005 et les références qui y sont citées)⁴⁴ :

⁴³ La peau est habituellement considérée comme une barrière efficace contre les particules, mais cette thèse est actuellement remise en question par des recherches récentes qui indiquent que des nanoparticules spécifiques pénètrent la peau tendue (par exemple, au poignet) ou les tissus de peau intacts, selon leur nature chimique, leur taille, leur forme et la matrice sous laquelle ils entrent en contact avec la peau (Muller-Quernheim, 2003, <http://www.orpha.net/data/patho/GB/uk-CBD.pdf>; Tinkle et al. 2003, *Environ. Health Perspect.* 111:1202-8; and Ryman-Rasmussen et al. 2006 *Toxicol. Sci.* 91:159-65).

⁴⁴ NEAA 2005. Particulate Matter: a Closer Look, www.rivm.nl, Netherlands Environmental Assessment Agency, E. Buijsman, J.P. Beck, L. van Bree, F.R. Cassee, R.B.A. Koelemeijer, J. Matthijsen, R. Thomas et K. Wieringa.

- Inflammation des voies respiratoires
- Bronchite
- Asthme
- Effets cardiovasculaires.

Cette règle générale n'est toutefois plus valide pour les nanoparticules, une part importante des nanoparticules inhalées se déposant dans le nez⁴⁵. Quant à tout autre transport dans le corps, il a été observé que certaines de ces nanoparticules atteignent le système nerveux, les tissus cérébraux et d'autres organes comme le sang, le cœur, le foie et la moelle osseuse, où elles sont susceptibles de provoquer d'avoir une action inflammatoire entraînant une cascade d'effets secondaires pour la santé (Oberdorster et al. 2004 et les références qui y sont citées⁴¹; et pour une étude plus récente de la question, Politis et al. 2008⁴⁶) : irritation, inflammation, mort des cellules, croissance extraordinaire des cellules, endommagement de l'ADN et perturbation hormonale (Donaldson et al., 1996; Zang et al., 1998).

4.3 Problèmes de santé et de sécurité posés par plusieurs nanoparticules

Bien qu'on ne connaisse encore que peu de choses sur la toxicité des nanoparticules, les recherches se poursuivent et les premiers résultats sont disponibles. Les nanotubes de carbone, le TiO₂, le SiO₂ et l'argent sont parmi les nanoparticules les mieux étudiées à ce jour.

Profils de toxicité individuels

Les nanotubes de carbone ont retenu récemment l'attention des médias à la suite d'études de toxicité qui ont mis en évidence des premiers indices d'un comportement semblable à celui de l'amiante dans les tissus pulmonaires⁴⁷. On a toutefois observé que la toxicité dépendait du rapport entre la longueur et le diamètre, de l'état d'agglomération, des caractéristiques de surface et de la présence de petites impuretés de catalyseurs de métal⁴⁸.

Le TiO₂ peut être appliqué sous la forme anatase ou rutile, la première (utilisée le plus souvent pour des applications photocatalytique) étant généralement la plus toxique⁴⁹. Le Conseil international pour la gestion des risques (CIGR) conclut que l'exposition de la peau intacte au TiO₂ nanométrique n'affecte pas la santé humaine⁵⁰, mais qu'une pénétration de la peau endommagée est possible⁵¹. Une vue d'ensemble des effets sur la santé est donnée par le NIOSH⁵². Le nano-TiO₂ est susceptible de présenter (dans certaines conditions) un

⁴⁵ CIPR 1995. Commission internationale de protection radiologique.

⁴⁶ Politis M, Pilinis C, Lekkas TD 2008. Ultra Fine Particles and Health Effects. Dangerous. Like no Other PM? Review and Analysis, *Global NEST Journal*. Vol 10(3), pp. 439-452.

⁴⁷ Voir par exemple : Poland CA, et al. 2008, *Nature Nanotechnology*, Vol 3, juillet 2008, p. 223 ; Pacurari M et al 2008 *Environmental Health Perspectives*, Vol 116, n° 9, 1211 ; Kostaleros K 2008., *Nature Biotechnology*, Vol 26, n° 7, 774-776.

⁴⁸ Pulskamp K et al 2006 *Toxicology Letters*, 168, 58-74; Wick P et al. 2007 *Toxicology Letters*, 168, 121-131.

⁴⁹ Sayes CM et al 2006 *Toxicol. Sciences* 92(1), 174-185

⁵⁰ CIGR 2008. Risk Governance of Nanotechnology Applications in Food and Cosmetics, ISBN 978-2-9700631-4-8

⁵¹ CSPC 2007. Avis sur la sécurité des nanomatériaux dans les produits cosmétiques, adopté le 18 décembre 2007.

⁵² NIOSH Draft 2005. Evaluation of Health Hazards and Recommendations for Occupational Exposure to Titanium Dioxide, *Draft Nov. 22, 2005*

potentiel génotoxique et présente des effets inflammatoires lors de l'inhalation. Une exposition de longue durée au TiO₂ anatase présente en outre des signes d'effets cancérigènes, d'endommagement de l'ADN et d'effets sur le développement nerveux central du fœtus, ce qui semble indiquer des effets reprotoxiques possibles chez les êtres humains⁵³.

Le SiO₂ peut être amorphe ou cristallin. D'après le CIGR^{54,55}, le nano-SiO₂ amorphe de synthèse est soluble dans l'eau, non toxique et présente normalement des facteurs de risques de toxicité pour l'homme similaires à ceux de la poussière de silice amorphe conventionnelle. Toutefois, selon la méthode de production, le SiO₂ amorphe peut être contaminé par du SiO₂ cristallin, qui affecte la toxicité de l'échantillon total en fonction de la fraction cristalline. La silice cristalline est très toxique, et on sait qu'elle provoque la silicose en cas d'exposition professionnelle.

On sait peu de choses sur la toxicité du nano-argent chez les êtres humains. Wijnhoven *et al.* (2009)⁵⁶ ont passé en revue les lacunes dans nos connaissances et conclu que, bien que l'argent normal est relativement non toxique, le nano-Ag inhalé ou ingéré peut pénétrer le courant sanguin et aboutir dans le système nerveux central, où il est susceptible d'avoir des effets contraires, potentiellement plus graves que l'argent normal, notamment à cause de la grande surface des nanoparticules, qui provoquera la diffusion d'une concentration relativement plus élevée d'ions argent dissous (et réactifs).

Risques liés à l'exposition professionnelle

Nous ne disposons que de peu d'informations pour évaluer les risques liés à l'exposition professionnelle aux nanoparticules des travailleurs du bâtiment. L'exposition aux nanoproducts par inhalation de poussières ou d'aérosols est, dans une certaine mesure, évidente. L'évaluation des risques d'exposition en cas d'usinage ou de manipulation d'un nanoproduct est en revanche beaucoup moins directe. Des premières indications peuvent être déduites des travaux de Vorbau *et al.* (2009), Koponen *et al.* (2009) et Kaegi *et al.* (2008)⁵⁷. La première étude a prouvé que l'adjonction de nanoparticules à un revêtement n'entraîne pas nécessairement une usure accrue de la pellicule protectrice qui en résulte. La deuxième étude a établi que les revêtements étudiés ne génèrent pas de nanoparticules individuelles lors du ponçage (bien que la taille de la poussière produite est de l'ordre du micron) et que par contre, les particules ultrafines émises par la ponceuse dominent les émissions de particules inférieures à 50 nm. La troisième étude indique que le nano-TiO₂ ne filtre pas d'un revêtement séché mais qu'il atteint l'environnement lorsqu'il « casse » avec le matériau liant au cours de l'usure. Ces premiers résultats semblent prometteurs dans le sens où l'on n'a pas constaté que des nanoparticules se libèrent *aussi facilement que ça*. Toutefois, les travaux réalisés sur cette question sont encore trop limités pour pouvoir tirer d'autres conclusions quant aux risques liés à l'exposition aux nanoparticules résultant du travail sur les nanoproducts en général. Nos connaissances ne suffisent pas non plus à

⁵³ Simizu M *et al.* 2009 *Part. Fibre. Toxicol.* Vol 6, 20; Bhattacharya K *et al.* 2008 *Part. Fibre. Toxicol.* Vol 6, 17.

⁵⁴ Conseil international pour la gestion des risques, 09-2008; ISBN 978-2-9700631-4-8

⁵⁵ Merget R *et al.* 2002 *Arch. Toxicol.* 75:625.

⁵⁶ Wijnhoven SWP *et al.* 2009 *Nanotoxicology*, 1-30.

⁵⁷ Vorbau M *et al.* 2009 *Aerosol Science* 40:209-217; Koponen IK *et al.* 2009 *Journal of Physics Conference Series*, 151, 012048; Kaegi R *et al.* 2008. *Environ. Pollut.* doi:10.1016/j.envpol.2008.08.004

extrapoler les conclusions de Kopenen, Vorbau et Kaegi afin d'estimer les risques liés à l'exposition à d'autres types de nanoparticules que celles étudiées.

4.4 Approches possibles pour utiliser les nanoproducts en toute sécurité

L'aménagement d'un lieu de travail sûr suppose de bien connaître la nature potentiellement dangereuse des nanoparticules et de leur comportement lorsque l'on utilise les produits qui en contiennent. Or, ainsi que nous l'avons exposé, les connaissances sur les propriétés toxicologiques des nanoparticules sont assez limitées en 2009. Il en va de même de la dissémination potentielle de nanoparticules pendant l'utilisation, le nettoyage ou l'entretien de nanoproducts. Il devient donc difficile de réaliser une évaluation fiable des risques. Quoi qu'il en soit, l'utilisation de nanoproducts dans le secteur de la construction est une réalité, et on peut s'attendre à ce qu'elle se développe dans un proche avenir, ce qui appelle à une approche responsable, qui tienne compte des enseignements du débat européen sur les nanotechnologies⁵⁸. La démarche de précaution dont il est ici question peut être définie comme une stratégie consistant à gérer les incertitudes d'une manière vigilante, consciencieuse, raisonnable, transparente et appropriée à la situation. Cette stratégie devrait être mise en œuvre dans le cadre de la politique des conditions de travail (dans le cadre de l'inventorisation et de l'évaluation des risques et du plan d'action associé). En bref, cette stratégie se présente comme suit (voir aussi Tableau 0-2).

Focalisation sur les activités prioritaires

Pour apporter une aide pratique aux sociétés, il est préférable que de bonnes pratiques soient définies pour les lieux de travail où une exposition aux nanoparticules est susceptible de se produire.

Il peut être utile de classer les nanoparticules en fonction des risques qui leur sont associés afin de déterminer les activités sur lesquelles il y a lieu de se focaliser et l'ampleur des mesures à prendre. Un système simple à trois catégories (les risques attendus allant de I à III par ordre décroissant) peut être utilisé comme fondement⁵⁹:

- I Nanoparticules fibreuses insolubles (longueur > 5 µm).
- II Nanoparticules dont on sait qu'elles sont cancérogènes, mutagènes, asthomogènes ou reprotoxiques, sous leur forme moléculaire ou sous forme de particules plus grandes.
- III Nanoparticules insolubles ou difficilement solubles (n'appartenant pas aux catégories précitées).

La recommandation générale est d'éviter l'exposition par inhalation ou contact avec la peau. Pour le secteur de la construction, les activités prioritaires sont le ponçage, le forage, le mélange, l'usinage, la découpe et la pulvérisation de nanomatériaux et de nanoproducts, ainsi que le nettoyage du lieu de travail et des équipements utilisés. Afin d'arrêter des mesures et de prévenir l'exposition, la politique classique d'hygiène du travail, appliquée aux nanoparticules, peut être adoptée.

⁵⁸ Voir en particulier les recommandations du Conseil socioéconomique néerlandais (SER) : « *Nanoparticles in the Workplace, health and safety precautions* », 2009 Sociaal Economische Raad, La Haye, Pays-Bas. La démarche de précaution proposée ici se base en partie sur ces recommandations.

⁵⁹ BSI 2007 (décembre 31), « Public Document » PD 6694-2:2007, « Nanotechnologies -- Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials ». Ce document prévoit une quatrième catégorie : les nanoparticules solubles. Nous l'avons ignorée ici dans la mesure où notre attention se porte principalement sur les nanoparticules non solubles.

Tableau 0-2 Éléments d'une démarche de précaution

Éléments d'une démarche de précaution en matière de nanomatériaux
<ul style="list-style-type: none"> • Pas de données, pas d'exposition <ul style="list-style-type: none"> - Prévenir l'exposition conformément à la politique d'hygiène du travail (y compris la substitution finale des nanoparticules potentiellement très dangereuses) • Notification de la composition des nanoproducts pour les fabricants et les fournisseurs <ul style="list-style-type: none"> - Déclaration de la teneur en nanomatériaux du produit tout au long de la chaîne de production - Déclaration de la teneur en nanomatériaux du produit à une administration centrale sous la forme d'une base de données • Enregistrement de l'exposition pour le lieu de travail <ul style="list-style-type: none"> - Système analogue à l'enregistrement des substances cancérigènes pour les nanofibres et les nanomatériaux CMRS - Système analogue à l'enregistrement des substances reprotoxiques pour les autres nanomatériaux non solubles • Communication transparente sur les risques <ul style="list-style-type: none"> - Informations sur la FTSS concernant les risques connus des nanomatériaux, la gestion et les lacunes dans les connaissances. - Exiger un rapport de sûreté chimique (REACH) pour les substances >1 tonne/an/entreprise • Dérivation des LEP ou des valeurs de référence en matière de nanomatériaux <ul style="list-style-type: none"> - Pour les nanoparticules susceptibles de se diffuser sur le chantier de construction

Notification pour les nanoproducts

Les résultats de l'enquête 2009 et des interviews approfondies ont permis de conclure que la plupart des travailleurs du bâtiment et de leurs employeurs ne sont pas conscients ou mal informés des nanoproducts avec lesquels ils sont susceptibles de travailler. Comment peuvent-ils donc procéder à une évaluation correcte des risques ?

L'information est une première condition. Une demande grandissante du marché plaide en faveur de l'instauration d'une forme d'obligation de notification (par ex., aux Pays-Bas (SER), en France et en Suisse). La notification est notamment nécessaire pour les nanoproducts les plus dangereux et présentant des risques élevés. Les fiches techniques santé-sécurité (FTSS) peuvent être utilisées pour communiquer ces informations du fabricant aux utilisateurs des produits. Les employeurs et les employés du secteur du bâtiment pourraient se référer à ces initiatives et exiger avec insistance des informations explicites sur la teneur en nanoparticules des produits utilisés et les mesures de précaution à prendre pour éviter d'éventuels effets secondaires nuisibles à la santé, dus à l'exposition aux nanoparticules.

Valeurs de référence en matière de nanoparticules

Dans des conditions normales, les limites d'exposition professionnelles (LEP) pour raisons sanitaires indique le niveau d'exposition au-dessous duquel le travail peut être considéré comme sûr. Pour les nanoparticules, par contre, ces valeurs n'existent pas. Les *valeurs de référence en matière de nanomatériaux* (VRN), que l'on peut définir comme des valeurs limites d'exposition basées sur une démarche de précaution, peuvent apporter une solution jusqu'à ce que des LEP soient définies. Les « *niveaux d'exposition de référence* » du Tableau 0-3 (basé sur BSI 2007)⁵⁹ en sont un exemple.

Tableau 0-3 Classification des risques liés aux nanoparticules insolubles et valeurs de référence

Cat	Description	VRN	Remarque
I	Fibreux ; un nanomatériau insoluble présentant un rapport d'aspect élevé ^a	0,01 fibres/ml	Analogues aux fibres d'amiante.
II	Tout nanomatériau qui est déjà classé, sous sa forme moléculaire ou sous forme de particules plus grandes, comme une substance cancérigène, mutagène, toxique pour la reproduction ou sensibilisante (CMR)	0,1 x LEP existante pour la forme moléculaire ou les particules plus grandes	Le taux potentiellement accru de dissolution de ces matériaux sous forme de nanoparticules pourrait donner lieu à une biodisponibilité accrue. Un facteur de sécurité de 0,1 a donc été instauré.
III	Nanomatériaux insolubles ou difficilement solubles ne figurant pas dans la catégorie des particules fibreuses ou CMRS	0,066 x LeP existante pour la forme moléculaire ou les particules plus grandes	Par analogie avec le NIOSH ⁶⁰ , un facteur de sécurité de 0,066 (= 15 x plus faible) est conseillé. Un niveau de référence alternatif est suggéré, à savoir, 20 000 particules/ml, distinct de la concentration environnementale ambiante de particules.

^a Une fibre est définie comme une particule dont le rapport d'aspect est supérieur à 3:1 et la longueur supérieure à 5000 nm.

Registre des entreprises et enregistrement de l'exposition

L'autre manière de mettre en œuvre une démarche de précaution, suggérée par le Conseil socioéconomique néerlandais, consiste à créer un système d'enregistrement des risques dans les entreprises qui travaillent avec les nanoproducts contenant les nanoparticules les plus dangereuses (c'est-à-dire des catégories I et II). Il sera difficile aux travailleurs du bâtiment sur chantier de juger si le contrôle des risques pour la santé et la sécurité est approprié et utile, et si tel est le cas, dans quelles circonstances. En l'absence d'informations, il est conseillé de noter dans le registre des expositions les employés qui ont ou pourraient avoir été exposés à des nanoparticules, lesquelles d'entre elles, à quel moment (pendant quelle durée) et à quel endroit (dans quelles circonstances), dans un système pouvant être conçu conformément aux pratiques courantes en matière d'asbestiforme et de substances CMR. Ce type d'enregistrement peut convenir aux pratiques des petites entreprises, et il permet de retrouver la trace des personnes éventuellement exposées et estimer l'importance de leur exposition au cas où la dangerosité d'un nanomatériau devrait être établie à l'avenir ou que des effets sur la santé devraient être éprouvés.

Control Banding

Une autre manière de gérer les dangers incertains dans un environnement de travail ou une activité donnée et d'estimer les risques potentiels en jeu de manière pragmatique et précautionneuse consiste à utiliser un outil de « *control banding* » (CB). Divers CB existent et sont utilisés par des PME dans le monde entier (voir Tischer et al. 2009 et les références qui

⁶⁰ Sur la base de l'approche décrite par le NIOSH pour le nano-TiO₂ insoluble : NIOSH 2005, Draft NIOSH current intelligence bulletin: Evaluation of Health Hazard and Recommendations for Occupational Exposure to Titanium Dioxide, 22 novembre 2005.

y sont citées⁶¹). Le CB conseille de prendre des mesures de protection généralisées sur la base des dangers posés par le matériau concerné, la teneur en poussière de l'atmosphère et certaines nanocaractéristiques telles que la taille, la forme et la réactivité de surface des nanomatériaux, la quantité de matériau utilisée et la probabilité d'exposition. Un exemple de ce genre de méthode CB a été développée par Paik et al. (2008)⁶².

⁶¹ Tischer M, Bredendiek-Kamper S, Poppek U, Packroff R 2009. How Safe is Control Banding? Integrated Evaluation by Comparing OELs with Measurement Data and Using Monte Carlo Simulation, *Ann Occup. Hyg.* Vol 53(5):449-462

⁶² Paik SY, Zalk DM, Swuste P. 2008. Application of a Pilot Control Banding Tool for Risk Level Assessment and Control of Nanoparticle Exposures. *Ann Occup. Hyg.* Vol 52(6):419-428

5. Autres mesures possibles pour renforcer la sûreté du lieu de travail

À l'heure actuelle, le fait de travailler avec des nanoproducts, de les appliquer ou de les usiner présente des risques pour la santé qui sont incertains et que l'on commence seulement à mieux comprendre. Cela comprend les profils de santé et de sécurité des nanoparticules mêmes, ainsi que les risques réels d'exposition à ces nanoparticules que l'on court en travaillant avec le produit. Du fait d'un rapport surface/volume plus grand, de propriétés électroniques nouvelles, d'une cinétique de transport et d'un destin biologique différents et d'une altération de la réactivité chimique observée sur plusieurs nanoparticules, en comparaison avec leur matériau parent macroscopique, les nanoparticules ont fait naître le soupçon qu'ils pourraient comporter des risques pour la santé encore imprévisibles et potentiellement graves, ce qui rend plus compliquée l'évaluation et la gestion adéquates des risques. À ce jour, aucun code de conduite ou bonnes pratiques n'ont été élaborés pour aider le secteur de la construction à gérer ces incertitudes. L'expérience du travail avec des substances chimiques (dangereuses) nous enseigne toutefois que des mesures de précaution peuvent être définies pour gérer de manière responsable les incertitudes actuelles liées aux risques que les nanoproducts présentent pour la santé. Cette stratégie est généralement qualifiée de démarche de précaution. Elle a comme point de départ la prévention de l'exposition aux nanoparticules par la mise en œuvre de la politique d'hygiène du travail. Lorsque l'exposition est effectivement prévenue (en cas de données insuffisantes sur les dangers), cette stratégie est conforme au principe de REACH « *pas de données, pas de marché* ». Dans le cadre d'une démarche de précaution, les éléments possibles suivants sont proposés pour renforcer la sûreté du lieu de travail :

- Pas de données, pas d'exposition
 - Prévenir l'exposition conformément à la politique d'hygiène du travail (y compris la substitution finale des nanoparticules potentiellement très dangereuses)
- Notification de la composition des nanoproducts pour les fabricants et les fournisseurs
 - Déclaration de la teneur en nanomatériaux du produit tout au long de la chaîne de production
 - Déclaration de la teneur en nanomatériaux du produit à une administration centrale sous la forme d'une base de données
- Enregistrement de l'exposition pour le lieu de travail
 - Système analogue à l'enregistrement des substances cancérigènes pour les nanofibres et les nanomatériaux CMRS
 - Système analogue à l'enregistrement des substances reprotoxiques pour les autres nanomatériaux non solubles
- Communication transparente sur les risques
 - Informations sur la FTSS concernant les risques connus des nanomatériaux, la gestion et les lacunes dans les connaissances.
 - Exiger un rapport de sûreté chimique (REACH) pour les substances >1 tonne/an/entreprise
- Dérivation des LEP ou des valeurs de référence en matière de nanomatériaux
 - Pour les nanoparticules susceptibles de se diffuser sur le chantier de construction

L'évaluation adéquate des risques est en outre compliquée par le fait que dans de nombreux cas, les informations spécifiques aux nanomatériaux dont le producteur de matériaux bruts dispose se perdent tout au long de la chaîne d'utilisation et que seule une petite partie des

ces informations parviennent effectivement aux travailleurs du bâtiment sur les chantiers. Cette situation peut être encore plus grave pour les travailleurs du bâtiment participant (par exemple) à un projet de rénovation d'une construction contenant des nanoproducts (par ignorance du propriétaire de la construction). Il incombe aux autorités et aux fournisseurs des nanomatériaux d'améliorer cette situation.

Comme l'opérationnalisation de ces mesures de protection au cas par cas constitue une tâche complexe, en particulier pour les PME du secteur du bâtiment, il est recommandé d'encourager l'instauration de bonnes pratiques de travail pour une série d'activités hautement prioritaires où une exposition est prévisible, comme le fait de travailler avec des nanorevêtements et du nanociment ou du nanobéton – par exemple, pulvérisation de nanorevêtement, manipulation de nanoparticules contenant du mortier humide, usinage de nanoproducts (ponçage ou forage) ou nettoyage ou entretien d'équipements utilisés à ces fins. Le « control banding » est un outil susceptible de contribuer à l'élaboration de ces bonnes pratiques. Il établit une classification des risques en fonction des connaissances disponibles sur la nanoparticule, son matériau parent (forme macroscopique), la pratique de travail et les conditions de travail réelles. La gravité du danger potentiel et la probabilité de l'exposition professionnelle sont estimées et reliées à un niveau de risque allant de 1 à 4. En fonction du niveau de risque, une stratégie générale de gestion des risques est proposée, qui peut aller de la « ventilation » au « port d'une protection personnelle » ou encore au « travail dans un environnement clos ».

Il existe des instruments de mesure de l'exposition aux nanoparticules en temps réel sur le lieu de travail, mais ils sont en général onéreux et difficiles à manipuler. Des appareils portatifs, plus faciles à utiliser, ont été mis au point, et des modèles moins chers, accessibles à un plus large public, seront commercialisés dans les prochaines années. Les mesures de l'exposition personnelle aux nanoparticules dans le secteur de la construction restent encore très limitées. Les premières mesures de l'abrasion de surfaces peintes aux nanopeintures n'ont pas permis de détecter une exposition aux nanoparticules manufacturées, mais étant trop limitées, elles ne permettent pas de tirer des conclusions générales sur l'exposition aux nanoparticules générées sur les chantiers.