

Nanotechnologies, climat et énergie :

des promesses trop torrides dans l'air ?

Voici une traduction des pages 5-6, 12-30, 61-64 et 73-77 du rapport de Ian Illuminato (Amis de la Terre Etats-Unis) et Georgia Miller (Amis de la Terre Australie) paru en novembre 2010 sous le titre :
 « *Nanotechnology, climate and energy: over-heated promises and hot air* ».

La version intégrale en anglais, commanditée par les AT Australie, les AT EWNI (Angleterre, Pays de Galles, Irlande du Nord), les AT Europe et les AT Etats-Unis, est téléchargeable sur :
<http://www.amisdelaterre.org/Nanotechnologies-leurs-vrais-couts.html>

La présente traduction a été assurée par des bénévoles (un grand merci à Annick et à Jérôme). Quoique scrupuleuse, elle ne vise pas une qualité professionnelle, mais juste à rendre accessibles à un plus large public de non-anglophones des éléments trop méconnus de ce dossier.

Les références entre parenthèses renvoient à la bibliographie des pages 78 à 87 du document anglais.
 Les titres des chapitres non encore traduits sont indiqués au fil du texte.

Si certains lecteurs ou lectrices se sentent prêts à s'atteler bénévolement à la traduction de certains d'entre eux, ne pas hésiter à contacter : mariec@aliceadsl.fr

La contribution des Amis de la Terre France au « débat public » de 2009 sur les nanotechnologies et le texte de positionnement spécifique que la fédération française a finalement adopté en 2010 vont un peu au-delà des recommandations du présent rapport. Ils sont téléchargeables sur :
<http://www.amisdelaterre.org/-Nanotechnologies-.html>

Synthèse du rapport « Nanotechnologies, climat et énergie »

Dans un monde de plus en plus préoccupé par le changement climatique, l'épuisement des ressources, les pollutions et la pénurie d'eau, les nanotechnologies ont été abondamment présentées comme la nouvelle panacée pour sauver l'environnement. Leurs partisans ont affirmé qu'elles allaient offrir des technologies énergétiques efficaces, bon marché et écologiques. Ils prédisent que la nanostructuration de haute précision et l'usage de quantités moindres de puissants nanomatériaux rompra le lien entre activité économique et consommation des ressources. Bref, selon eux, les nanotechnologies permettront la poursuite de la croissance économique et l'expansion de la culture consumériste à un coût écologique considérablement réduit.

Dans la présente étude réalisée par les Amis de la Terre, les prétentions « vertes » des industriels du secteur sont examinées à la loupe pour la première fois. Or notre enquête révèle que l'industrie des nanotechnologies a beaucoup trop promis et pas assez tenu. Nombre des allégations sur les performances écologiques des nanotechnologies, et quantité d'annonces de percées majeures faites par des entreprises qui assurent être à deux doigts du stade commercial, ne correspondent en rien à la réalité. Pire, le coût énergétique et environnemental de l'industrie en plein essor des nanotechs est bien plus élevé que prévu.

Ce rapport révèle aussi que, malgré leur rhétorique verte, les gouvernements des États-Unis, de l'Australie, du Royaume-Uni, du Mexique, du Japon et de l'Arabie Saoudite affectent des fonds publics à la mise au point de nanotechnologies visant à trouver et extraire davantage de pétrole et de gaz. Les plus grosses sociétés pétrochimiques de la planète, dont Halliburton, Shell, BP America, Exxon Mobil et Petrobras, ont créé un consortium pour financer des recherches en vue d'accroître l'extraction de pétrole.

Par ailleurs, les performances du recours aux nanotechnologies dans le secteur des énergies renouvelables ont été considérablement inférieures aux prédictions. Le rendement de conversion de

l'énergie solaire des panneaux photovoltaïques nanotechnologiques est encore environ moitié moindre que celui des panneaux au silicium. Le défi technique consistant à passer de l'exploit de laboratoire à celui de la fabrication en série s'est bien souvent révélé impossible à surmonter. En 2009, d'après le groupe de conseillers du président des Etats-Unis sur la science et la technologie, 1 % seulement de l'ensemble des produits intégrant des nanotechnologies concernaient le secteur de l'énergie et de l'environnement.

Contre toute attente, la consommation d'énergie et les impacts environnementaux de la fabrication de nanomatériaux sont extrêmement élevés. A masse de substance égale, fabriquer des nanofibres de carbone requiert 13 à 50 fois plus d'énergie que fondre de l'aluminium, et 95 à 360 fois plus d'énergie que produire de l'acier. Une équipe américaine de chercheurs a abouti à la conclusion que les nanotubes de carbone monofeuillet pourraient bien être « un des matériaux les plus énergivores qu'ait connus l'humanité ».

Vu l'importance des quantités d'énergie exigées par leur fabrication, certaines applications des nanotechnologies au domaine des économies d'énergie se solderont même par une perte énergétique nette. Ainsi, renforcer des pales d'éoliennes avec des nanofibres de carbone a beau alléger les pales, le début des analyses de cycle de vie suggère que l'énergie nécessaire pour fabriquer ces pales nanotechnologiques rend sans doute énergétiquement plus efficace de s'en tenir aux pales classiques.

Quant aux progrès très médiatisés des nanotechnologies dans le secteur de l'hydrogène, ils n'en sont qu'à un stade très précoce. Il est douteux que des voitures roulant à l'hydrogène issu d'énergies renouvelables soient en circulation dans les dix ou vingt prochaines années, période durant laquelle les réductions d'émissions de gaz à effet de serre sont pourtant cruciales. Pour l'heure, tout essor des voitures à hydrogène renforcerait en pratique notre dépendance aux hydrocarbures requis pour produire l'hydrogène.

La majorité des nanoproduits ne sont pas conçus pour le secteur de l'énergie et auront un coût énergétique net sans le moindre gain environnemental. La fabrication de clubs de golf super-résistants renforcés aux nanotechnologies, ou de cosmétiques aux nanoparticules pour masquer les rides, ou encore d'écrans de télévision à couleur améliorée, requiert beaucoup d'énergie sans procurer aucun bénéfice écologique. Or les applications de ce type sont infiniment plus nombreuses que celles où les nanotechnologies pourraient offrir de réelles économies d'énergie.

Le coût écologique des nanoproduits est plus élevé que celui des matériaux classiques. Leur processus de fabrication se caractérise par une consommation massive d'eau et de solvants. D'énormes quantités de substances dangereuses y sont utilisées ou créées comme sous-produits. Par exemple, on ne retrouve dans le produit final que 0,1 % de tous les matériaux nécessaires pour fabriquer des nanoproduits pour ordinateurs et autres articles électroniques. Autrement dit, 99,9 % des matériaux employés se transforment en déchets en cours de fabrication.

Bien que de grandes incertitudes subsistent, un nombre croissant d'études démontrent que certains nanomatériaux utilisés pour la production et le stockage d'énergie ou l'efficacité énergétique présentent un risque sanitaire et environnemental. On vante beaucoup l'emploi des nanotubes de carbone dans l'électronique, les applications énergétiques et des pièces spéciales de voitures ou d'avions, mais les premières études montrent déjà que certaines formes de nanotubes provoquent des mésothéliomes, une forme de cancer mortel jusqu'ici associé à l'amiante.

La libération de nanomatériaux dans l'environnement pourrait aussi entraîner une accélération de la formation de puissants gaz à effet de serre. En raison de ses propriétés antibactériennes, le nanoargent est largement utilisé dans des vêtements et textiles, des produits de nettoyage, des articles d'hygiène corporelle et des revêtements de surface. Or une étude préliminaire montre qu'en présence de nanoargent, des boues comme celles des usines d'épuration d'eau dégagent quatre fois plus de protoxyde d'azote, un redoutable gaz à effet de serre.

Les nanotechnologies ne sont pas le remède miracle qui sauvera l'environnement. Il est exclu qu'une généralisation de leur usage – des chaussettes aux crèmes de beauté – permette de poursuivre le « business as usual » tout en réduisant substantiellement notre empreinte écologique. Au mieux, ceux qui avancent de telles allégations prennent leurs rêves pour des réalités. Au pire, elles

relèvent d'un *greenwashing* trompeur et fallacieux.

Les nanotechnologies sont de puissants outils qui pourraient, en théorie, offrir de nouvelles façons d'envisager la manière de capter, exploiter et stocker l'énergie. Cependant, les Amis de la Terre préviennent que, dans l'ensemble, le coût énergétique et plus généralement environnemental de ces technologies est colossal. Au bout du compte, les nanotechnologies risquent surtout de faciliter une prochaine vague d'expansion de l'économie mondialisée, aggravant notre dépendance aux combustibles fossiles et aux produits chimiques dangereux qui existent déjà tout en créant une série entièrement nouvelle de périls supplémentaires. En outre, les nanotechnologies menacent d'altérer irrémédiablement les portions de nature qui subsistent encore, en les incluant dans le système de production et de consommation dominant.

p. 7 Contexte général

p. 9 Les nanotechnologies, c'est quoi et qu'en fait-on ?

p. 11 Les nanotechnologies dans la production, le stockage et les économies d'énergie [...]

Tableau 1 : Les consommations électriques par foyer diffèrent grandement d'un pays à l'autre

	Consommation électrique annuelle par foyer	Nombre de personnes par foyer (année de référence)	Source
Etats-Unis	11 040 kWh (2008)	2,50 (2010)	US EIA 2010
Australie	7 987 kWh (2007)	2,60 (2006)	ESCAP 2010
Royaume-Uni	4 800 kWh (2007)	2,36 (2001)	UK BERR 2007
Chine	1 392 kWh (2007)	2,98 (2005)	ESCAP 2010
Inde	561,6 kWh (2007)	5,40 (2001)	ESCAP 2010
Bangladesh	336,0 kWh (2007)	5,60	ESCAP 2010

Nanotechnologies et énergie solaire

Résumé

En permettant la réalisation de panneaux solaires à couches minces par impression de rouleau à rouleau sur support souple plastique ou métallique, les nanotechnologies simplifient la production de ces panneaux et en élargissent la gamme d'applications, sur des objets portatifs par exemple. Fabriquer certains types de cellules solaires à base de couches minces ou de dépôts nanométriques devient possible pour un coût inférieur à celui des cellules classiques au silicium. Cependant, de récents investissements massifs des Chinois dans le photovoltaïque au silicium ont réduit le coût des modules classiques. En outre, le rendement de conversion solaire des panneaux à couches nanométriques reste très inférieur à celui des panneaux au silicium : 6 à 13 % contre environ 20 %. Le secteur nanotechnologique se heurte à d'innombrables difficultés pour passer du stade des réalisations de laboratoire à celui des produits commercialisables. La durée de vie des panneaux solaires de type DSSC (avec cellules à colorants, dites aussi cellules Grätzel) et celle des panneaux organiques à base de fullerènes est inférieure à 10 ans – soit 15 à 20 ans de moins que celle des panneaux classiques au silicium. Cela réduit d'autant leur efficacité énergétique rapportée à l'ensemble de leur cycle de vie. Les nanomatériaux employés dans le photovoltaïque – notamment l'argent, le cadmium, et d'autres métaux lourds – comportent de graves risques de toxicité pour les humains et l'environnement. La récupération en fin de vie des produits et leur recyclage ne sont guère rentables, requérant l'intervention des pouvoirs publics pour éviter toute mise au rebut irresponsable et récupérer les métaux précieux et terres rares qu'ils renferment. La faible disponibilité de métaux comme l'indium et le gallium pourrait bien limiter à court terme tout réel essor de certaines formes de modules photovoltaïques nanotechnologiques à couches minces.

Contexte

On peut produire de l'électricité au moyen de matériaux photovoltaïques (PV) intégrés dans des panneaux solaires, qui font office de semi-conducteurs. Outre leurs usages domestiques, ces panneaux commencent à être regroupés en centrales électriques solaires. Les cellules photovoltaïques transforment en électricité l'énergie lumineuse du rayonnement solaire qu'elles absorbent. Cela repose sur des technologies aussi complexes que celles des semi-conducteurs pour ordinateurs (les « puces » électroniques) qui servent à stocker de la mémoire dans de petits dispositifs. La plupart des cellules photovoltaïques sont en plaquettes épaisses de silicium. Le silicium étant fragile, les contextes d'utilisation de ces panneaux restent limités. En outre, fabriquer des panneaux au silicium revient plus cher que produire la même quantité d'énergie avec des combustibles fossiles.

Un autre domaine en plein essor est le solaire thermique ou thermodynamique. A la différence du photovoltaïque, il sert à produire de la chaleur plutôt que de l'électricité. Des collecteurs thermiques à basse et moyenne température sont couramment utilisés pour chauffer des piscines ou l'atmosphère de logements et de locaux professionnels. Mais il existe des modèles thermodynamiques à haute température, qui concentrent la lumière solaire au moyen de miroirs ou de lentilles, puis convertissent cette énergie thermique en électricité (solaire à concentration ; NREL s.d.). Le solaire thermodynamique à concentration est compatible avec les techniques de stockage d'énergie et les installations des centrales électriques classiques (ex. : centrales à vapeur) qui sont depuis longtemps raccordées aux réseaux de transport et de distribution (NSTC Committee on Technology 2010). Il est donc particulièrement attrayant pour les grosses compagnies d'électricité et les gouvernements qui cherchent à exploiter les énergies renouvelables tout en maintenant une production d'électricité centralisée.

Un atout clé du solaire thermique est la possibilité de stocker l'énergie sous forme de chaleur. Même si le coût reste élevé, un chercheur du National Renewable Energy Laboratory américain (US NREL) a annoncé que l'on pouvait maintenant stocker ainsi l'énergie pendant environ 16 heures (Beyond Zero Emissions 2009). Selon une étude menée par des chercheurs de l'université Stanford, 93 % de l'électricité qui passe annuellement par le réseau de distribution californien pourrait être fournie par des centrales solaires thermiques dotées d'une capacité de stockage de 15 heures. Si on leur affectait 140 kilomètres carrés de terrain, ces centrales solaires thermiques avec stockage pourraient fournir 95 % de la consommation annuelle de réseau des Etats-Unis.

Comment les nanotechnologies sont-elles censées améliorer les technologies existantes ?

Les nanotechnologies permettent de fabriquer des panneaux solaires à couches minces avec beaucoup moins de silicium. Dans le cas des panneaux « organiques » à cellules en plastique, il n'y a même plus de silicium du tout. Selon leurs promoteurs, les nanotechnologies permettront au photovoltaïque de concurrencer les sources d'énergie fossiles en accroissant le rendement de conversion de l'énergie lumineuse, en élargissant la gamme d'endroits où l'on pourra employer des panneaux solaires et en réduisant les coûts de production.

Une avancée capitale a été la mise au point de l'impression « de rouleau à rouleau » (analogue à celle des journaux) pour déposer des nanocomposants photovoltaïques sur des feuilles métalliques ou du film plastique. Cette technique offre une plus grande souplesse que les procédés de fabrication des cellules solaires au silicium. Les films souples sont aussi présentés comme moins chers à produire, même si beaucoup de firmes omettent d'indiquer leur coût par watt. Cependant, le prix des panneaux au silicium a récemment baissé (voir sections suivantes), et les défauts de fabrication sont plus nombreux avec l'impression de rouleau à rouleau (Gupta et al. 2009).

Les substrats en plastique ou en feuille métallique utilisés pour certains modules photovoltaïques souples permettent de se passer des encombrants châssis d'aluminium ou de verre des panneaux au silicium. On peut incorporer ces films à des supports bâtis plus diversifiés, et même en équiper des objets tels que bagages ou ordinateurs.

D'après les firmes qui vendent des modules (groupes de panneaux) solaires nanotechnologiques aux centrales électriques photovoltaïques, leur principal avantage réside dans leur rapidité de mise en

œuvre. En fournissant des panneaux à une centrale électrique allemande, Nanosolar a ainsi affirmé qu'une installation de 10 MW pouvait être « montée et mise en service en 6 à 9 mois, contre 10 ans ou plus pour des centrales à charbon et 15 ans pour des centrales nucléaires » (Vidal 2007).

En matière de solaire thermique, le recours aux nanotechnologies est surtout envisagé dans trois grands domaines : les revêtements visant à améliorer la capacité de collecte des capteurs solaires à concentration, l'amélioration des propriétés thermiques des fluides de stockage de la chaleur, et la mise au point de convertisseurs thermoélectriques (chaleur-électricité) efficaces (NSTC Committee on Technology 2010). Certaines entreprises commercialisent aussi des revêtements à base de nanomatériaux pour isoler les réservoirs thermiques solaires.

Où les nanotechnologies sont-elles employées ?

Les nanomatériaux offrent une surface de réaction accrue pour un même volume de matière. Ajouté à leurs propriétés optiques et électriques inédites, cela pourrait leur permettre de capter davantage de lumière solaire que ne le fait le silicium des panneaux classiques. Parmi les différents types de nanomatériaux actuellement incorporés dans des cellules solaires à couches minces figurent des fullerènes, du dioxyde de titane, de l'argent, des boîtes quantiques et du tellure de cadmium.

Les boîtes quantiques (*quantum dots*) sont des sphères de taille nanométrique de matériaux inorganiques aux propriétés optiques nouvelles, qui permettent à des rayonnements de diverses longueurs d'onde de produire de la lumière visible. Des boîtes quantiques au séléniure de cadmium combinées à d'autres nanoparticules, telles que des nanotubes (cylindres creux) de dioxyde de titane, pourraient accroître le rendement des cellules photovoltaïques en absorbant simultanément plusieurs longueurs d'onde de lumière, ce qui est impossible avec d'autres types de cellules (Berger 2008). L'institut PULSE de Stanford pour les sciences de l'énergie ultrarapide a étudié l'aptitude des boîtes quantiques à améliorer le rendement des cellules photovoltaïques et a démontré que, en laboratoire, un seul photon de lumière peut activer plusieurs électrons (Tuttle 2009).

Une cellule photovoltaïque à film mince (*thin film solar cell*, TFSC, ou *thin film photovoltaic cell*, TFPV) est une cellule réalisée en déposant une ou plusieurs couches minces de matériaux photovoltaïques sur un support. L'épaisseur de ces couches est très variable : de quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Un grand nombre de matériaux photovoltaïques différents peuvent être déposés, suivant des méthodes diverses, sur des substrats variés. Les TFSC sont généralement classées en fonction du matériau photovoltaïque employé :

- Silicium amorphe (a-Si) et autres formes de silicium en couche mince (TF-Si)
- Tellure de cadmium (CdTe)
- Cuivre indium gallium sélénium (CIS ou CIGS)
- Cellule photovoltaïque sensibilisée par un colorant (*dye-sensitized cell*, DSC) et autres cellules photovoltaïques organiques
- Couche mince de silicium (au silicium amorphe, protocristallin, nanocristallin, ou au silicium noir). Le silicium mince s'oppose au silicium en plaquettes ou massif (monocristallin ou polycristallin).

Un domaine d'application clé des nanotechnologies au solaire thermique pourrait être la fabrication de capteurs d'énergie solaire concentrée, avec la mise au point de matériaux et revêtements à haut pouvoir d'absorption optique du rayonnement lumineux, capables de fonctionner à des températures élevées sous de hauts flux de concentration solaire (NSTC Committee on Technology 2010). Des nanorevêtements à la surface des récepteurs pourraient améliorer leurs propriétés de captation et de transfert thermiques, tout en offrant une protection contre la corrosion (Berger 2009a).

Les recherches sur l'amélioration par des nanomatériaux des propriétés thermiques de fluides pour stocker la chaleur dans des centrales solaires thermiques n'en sont qu'à leurs débuts. Certains chercheurs estiment néanmoins qu'ajouter des nanomatériaux aux liquides pourrait être une façon d'accroître leur capacité de stockage thermique (Beyond Zero Emissions 2009).

Les tenants des nanomatériaux à propriétés thermoélectriques espèrent également qu'ils accroîtront le rendement de la conversion de chaleur en électricité (NSTC Committee on Technology 2010). Il s'agirait de récupérer l'énergie thermique de la chaleur dissipée durant la génération d'électricité solaire avec des dispositifs thermoélectriques. On étudie ainsi des films aux nanotubes de carbone fonctionnalisés en tant que matériaux thermoélectriques potentiels qui pourraient absorber de la chaleur et restituer de l'électricité. Mais là encore, ces recherches n'en sont qu'aux tout premiers stades.

Commercialisation

Bien qu'elles ne représentent encore qu'une petite fraction des ventes par rapport aux panneaux au silicium, les nanotechnologies sont en train d'accroître leur présence commerciale dans le photovoltaïque. En 2009, les ventes mondiales de PV ont représenté quelque 38,5 milliards de dollars. Jason Eckstein, un spécialiste du solaire pour la société d'analyses en technologies émergentes Lux Research, évalue à 75 % la part du silicium cristallin dans l'ensemble du marché mondial des technologies solaires. Les panneaux à couches minces de tellure de cadmium, surtout produits par First Solar, représentent 12 % du marché, tandis que le CIGS n'en détient que 1 à 2 % (Voith 2010). Un universitaire spécialiste du secteur du solaire organique a fait remarquer que la plupart des compagnies qui mettent au point des panneaux solaires à base plastique en restent au stade de la recherche et développement : « Pour l'heure, on peut affirmer sans risque que la part de marché du photovoltaïque organique avoisine zéro pour cent » (Jacoby 2010). Des arrangements à grande échelle de nanofilaments à base de dioxyde de titane (dont des nanotubes et des nanofils) sont cependant déjà utilisés dans des cellules photovoltaïques (Berger 2009b).

First Solar est de loin le principal fournisseur de cellules PV nanotechnologiques. En 2009, c'était le plus grand fabricant mondial de panneaux solaires. Il en a produit cette année-là plus d'un gigawatt (RenewableEnergyWorld.com 2010). La firme Nanosolar produit des modules solaires à couches minces à partir d'une encre comportant des nanoparticules photovoltaïques de sélénure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS). Cette encre nanoparticulaire est déposée sur des feuilles métalliques souples au cours d'un processus de production analogue à celui de l'imprimerie, puis enchâssée dans du verre. Walmart a récemment conclu un partenariat avec deux fabricants de CIGS, SolarCity et MiaSolé, pour installer des panneaux solaires à couches minces sur 20 de ses 30 bâtiments en Arizona et en Californie (Walmart 2010). Ironiquement, SolarCity va aussi installer pour Walmart un grand nombre de panneaux classiques au silicium, dont la plupart seront fabriqués à bas coût en Chine (Woody 2010).

Konarka, un autre fournisseur de cellules PV aux nanoparticules, a récemment ouvert ce qu'il présente comme la plus grande usine de fabrication de films plastiques solaires de rouleau à rouleau (Konarka 2010). En une percée notable, Konarka a noué un partenariat avec Traveler's Choice pour la mise au point d'une gamme de sacs de voyage et de bagages intégrant ses panneaux photovoltaïques souples, qui pourront dès lors alimenter de petits appareils (Konarka s. d.). Selon le fabricant, en plein soleil, un sac solaire peut recharger un téléphone portable en deux heures. Cette gamme est depuis peu disponible chez des détaillants de l'hémisphère nord.

On ignore si certaines centrales solaires thermiques utilisent déjà des nanomatériaux dans leurs fluides de stockage, mais plusieurs entreprises ont mis sur le marché des nanoproduits destinés au thermique solaire. La société Nansulate vend ainsi un revêtement à base de nanomatériaux qui améliore selon elle les propriétés isolantes du stockage thermique (Nanotechnology Now 2010).

Les nanotechnologies tiennent-elles leurs promesses ?

Il y a un débat quant à l'ampleur réelle des avancées que les nanotechnologies pourraient amener dans le solaire. ***Face aux annonces que les nanotechnologies solaires fourniront bientôt de l'énergie à la moitié du prix du pétrole, du charbon ou du gaz, le PDG de la société d'analyse en nanotechnologies Cientifica a prévenu en 2007 que les obstacles au passage des découvertes de laboratoire au stade industriel sont considérables, et qu'il conviendra de confronter les promesses à la réalité*** » (Harper 2007). Les défis que représente la transformation d'une trouvaille de labo en produit apte à la mise sur le marché se sont en effet révélés prohibitifs pour nombre d'entreprises. Un

analyste de Lux Research a prévenu que même les fabricants les plus renommés de films photovoltaïques à couches minces qui prétendent recourir aux nanotechnologies pour abaisser leurs coûts ont eu du mal à passer des réalisations de laboratoire à l'échelle supérieure tout en conservant un produit fonctionnel (Lubick 2009). Comme le soulignait un récent article du *New York Times* : « produire des cellules CIGS en masse s'est révélé un formidable défi technologique » (Woody 2010).

Un groupe de chercheurs américains a averti que le tapage autour des nanotechnologies comporte des « affirmations discutables sur les données scientifiques » (Gupta et al. 2009). Ces auteurs sont pessimistes quant aux perspectives des nanotechs solaires : « il est peu probable que des cellules solaires nanostructurées jouent un rôle significatif dans la fabrication des futures générations de modules PV » (Gupta et al. 2009). Ils attribuent à des hypothèses irréalistes dans le travail théorique ainsi qu'à un manque de prise en compte des contraintes de fabrication et de passage au stade commercial ce battage publicitaire abusif sur le potentiel des nanos dans le photovoltaïque.

Un des domaines clés où les nanotechnologies offraient un avantage jusqu'à une date récente est la baisse des coûts de production. En général, à puissance énergétique équivalente, les panneaux à couches minces sont moins chers que ceux au silicium (Solarbuzz 2010). Dans sa revue d'octobre 2010 du prix de détail des modules solaires, Solarbuzz a trouvé comme prix de vente plancher pour un module solaire au silicium multicristallin 1,97 \$ par watt chez un détaillant états-unien. Pour un module au silicium monocristallin, le prix de vente le plus bas était de 2,21 \$ par watt (1,61 € par watt) chez un détaillant allemand. Et le moins cher des modules à couches minces se vendait 1,40 \$ par watt chez un détaillant installé aux Etats-Unis (Solarbuzz insiste sur la variabilité des caractéristiques techniques et des prix).

Or ces derniers temps, l'avantage en matière de coût associé à l'usage de matériaux nanométriques s'est réduit. La chute du prix du silicium a fait baisser les coûts de fabrication des modules classiques. Les investissements massifs du gouvernement chinois pour développer de manière importante sa production photovoltaïque ont contribué à faire chuter de 40 % l'an dernier le prix des panneaux solaires (Woody 2010). « Le marché du solaire a tellement changé que c'en est presque à pleurer » a déclaré au *New York Times* Joseph Laia, le président de la firme MiaSolé, qui produit des panneaux à couches minces.

Autre domaine où les nanoparticules offrent un avantage par rapport au silicium : la souplesse de production et d'utilisation des panneaux. Les quelques modules photovoltaïques existants à base de plastique plutôt que de silicium sont plus faciles à transporter et bien moins fragiles. Ces panneaux légers peuvent servir dans des contextes plus diversifiés, notamment sur des applications mobiles comme les ordinateurs portables ou les bagages. Konarka propose des panneaux solaires à intégrer à des valises et sacs de voyage pour alimenter des ordinateurs ou des téléphones portables (Konarka s. d.). Installés sur des toits ou d'autres parties de bâtiments, ces panneaux souples à couches minces sont très légers, ne risquent pas d'être soulevés par le vent, et l'on peut même marcher dessus (avec précaution).

En revanche, les nanotechnologies n'ont nullement rempli leurs promesses dans le domaine crucial du rendement de conversion. Leurs promoteurs ont beau espérer qu'à l'avenir, elles offriront des rendements bien supérieurs, le rendement des panneaux solaires à base de nanotechs reste très inférieur à celui des panneaux classiques au silicium (tableaux 2 et 3). Malgré les rendements élevés obtenus lors d'essais en laboratoire, les fabricants ont eu le plus grand mal à reproduire ces performances dans des applications commerciales. Une découverte initiale en laboratoire avait conduit à supposer que des générations futures de panneaux à boîtes quantiques pourraient assurer un rendement de conversion de 44 % dans des conditions de lumière normales et atteindre jusqu'à 68 % si la lumière solaire était concentrée d'un facteur 500 (NREL 2007). Or à ce jour, les rendements supérieurs des boîtes quantiques n'ont été obtenus qu'en labo (Kongkanand et al. 2008). De même, Nanosolar a atteint en 2009 un rendement de conversion vérifié par le NREL de 15,3 % sur un échantillon de laboratoire de ses panneaux CIGS, mais ceux qu'elle commercialise n'affichent que 8 à 9 % de rendement (Cheyney 2010a, Nanosolar 2009).

La compagnie MiaSolé a récemment fait l'objet d'une grande attention quand ses panneaux ont atteint les 14,3 % de rendement de conversion solaire (MiaSolé 2010). Ce fut, à n'en pas douter, une prouesse

remarquable : jusqu'alors, le rendement de conversion moyen des cellules nanotechnologiques plafonnait autour de 10 %. Cela n'en reste pas moins bien en deçà des plus de 20 % de rendement des cellules au silicium (tableaux 2 et 3). Par ailleurs, First Solar affirme que ses cellules à couches minces de tellurure de cadmium restent efficaces par temps chaud, nuageux, et dans des conditions de lumière diffuse (First Solar s. d.). Mais leur rendement de conversion n'est que de 11,2 %.

Tableau 2 : Coût au kWh de quelques types de panneaux PV nanotechnologiques [...]

Tableau 3 : Rendement des différents types de modules photovoltaïques [...]

La durée de vie de certains panneaux solaires nanotechnologiques est aussi très inférieure à celle des panneaux au silicium. Selon un rapport récemment commandité par Nanosolar, ses panneaux sur feuille souple au (di)séléniure de cuivre-indium-gallium (CGIS) tiendront 25 ans (Cheyney 2010b). En revanche, la durée de service actif des panneaux de cellules à colorant et des panneaux organiques aux fullerènes est très inférieure à 10 ans, comparés aux 25 à 30 ans de durée d'utilisation attendue des modèles au silicium (Reijnders 2010). Les panneaux solaires plastiques de Konarka ne durent que 5 à 6 ans. Si l'on tient compte de l'énergie nécessaire à leur production, leur efficacité énergétique sur l'ensemble du cycle de vie s'en trouve encore plus réduite.

A rebours du principe qui voudrait que « plus petit » soit forcément « mieux », Gupta et al. (2009) concluent à la nécessité, pour réduire les coûts de production, d'une fabrication à ultragrande échelle de groupes plus importants de modules photovoltaïques au silicium. Ils prédisent que la production de cellules au silicium restera le fondement de toute croissance future du secteur. Le récent essor massif de la production chinoise de panneaux au silicium, la baisse de leur coût et l'accroissement de la part des ventes de la Chine dans le photovoltaïque (Woody 2010) tendent à étayer ce point de vue.

Durabilité et cycle de vie

Les tenants du photovoltaïque à couches minces soutiennent que le secteur a devant lui des années de croissance avant d'avoir à craindre une pénurie de matières premières (Edwards 2010). Pourtant, des analystes de la rareté ont averti que le développement des nanotechs solaires risque d'être bloqué à très court terme par leur dépendance vis-à-vis de minerais rares comme l'indium ou le gallium, et de terres rares comme le sélénium et le tellure. L'ampleur des réserves d'indium et de gallium fait débat. Des chercheurs allemands affirment en tout cas que celles d'indium seront épuisées dans moins de dix ans (Cohen 2007). Selon des chercheurs néerlandais, dans la mesure où le nanophotovoltaïque à couches minces au tellurure de cadmium et au CIGS dépend de minerais rares comme l'indium et le gallium, il ne pourra jamais fournir plus de 2 % de la demande mondiale d'énergie, du fait des contraintes liées à la ressource (Kleijn et van der Voet 2010). Ces auteurs préviennent que les gouvernements devraient exiger des évaluations soigneuses de ce type de contraintes avant de financer plus avant les technologies à couches minces : « Des financements publics de grande ampleur pour des technologies qui resteront marginales ne constituent pas une façon efficace de s'attaquer à la crise énergétique et climatique » (Kleijn et van der Voet 2010, section 4.2).

Qu'est-ce que l'analyse de cycle de vie ?

L'analyse de cycle de vie ou ACV (en anglais LCA, *Life Cycle Assessment* ou *Life Cycle Analysis*, ou encore *Cradle to Grave Analysis*, analyse « du berceau au tombeau ») est une technique qui vise à évaluer chacun des impacts d'un processus ou d'un produit déterminés. Cela comprend l'extraction et la transformation des matières premières ; la fabrication du produit, son transport et sa distribution ; la phase d'utilisation, les réparations et la maintenance ; la mise au rebut ou le recyclage en fin de vie. L'objectif de l'ACV est de parvenir à une compréhension complète des exigences et conséquences environnementales d'un produit ou d'un processus industriel donné. Cela importe tout particulièrement pour éviter de déplacer des problèmes liés à une des phases du cycle de vie du produit (ex : émissions toxiques ou de GES à l'utilisation) sur une autre phase du cycle (ex. : forte consommation d'énergie et de produits chimiques à la fabrication).

Le Programme des Nations unies pour l'Environnement a averti que, en dépit des craintes du secteur

des hautes technologies concernant la rareté et la cherté de minerais comme l'indium et le gallium, seulement 1 % environ de ces métaux stratégiques est recyclé, le reste étant mis au rebut et perdu à la fin de l'utilisation de chaque produit (UNEP 2010a). Un rapport commandité par le PNUE a conclu que, sauf accroissement spectaculaire des taux de recyclage en fin de vie, les métaux spéciaux et terres rares pourraient devenir « essentiellement indisponibles » pour les produits de haute technologie.

Des entreprises comme Walmart ont prétendu que, dans la mesure où le photovoltaïque nanotechnologique à couches minces contient moins de matières premières, son impact environnemental global sera moindre, sur l'ensemble du cycle de vie, que celui des cellules solaires classiques au silicium (Walmart 2010). Mais c'est oublier le poids environnemental et le coût énergétique très élevés de la production de nanomatériaux (voir sections suivantes).

Il existe peu d'analyses de cycle de vie (ACV) des panneaux solaires nanotechnologiques. Il est donc malaisé de déterminer leurs bénéfices ou coûts énergétiques nets sur l'ensemble du cycle de vie par rapport à ceux au silicium. De même, il est difficile d'établir si les processus de fabrication de cellules photovoltaïques recourant aux nanotechnologies sont plus ou moins toxiques et néfastes pour l'environnement que ceux des cellules classiques au silicium.

Une étude basée sur les données de production du secteur photovoltaïque pour la période 2004-2006 a comparé, sur l'ensemble du cycle de vie, les émissions de gaz à effet de serre, les émissions de polluants clés et les rejets de métaux lourds de quatre grands types de systèmes PV commercialisés : silicium multicristallin, silicium monocristallin, silicium en ruban et couches minces de tellurure de cadmium (Fthenakis, Kim et Alsema 2008). Il est apparu que c'était la production de couches minces de tellurure de cadmium qui nécessitait le moins d'énergie, et qui avait donc le plus faible taux d'émissions nocives compte tenu des mix énergétiques alimentant actuellement les réseaux d'électricité aux Etats-Unis et en Europe. Mais ces chercheurs soulignent que les différences d'émissions entre les diverses technologies photovoltaïques restent très faibles par rapport aux émissions des énergies fossiles classiques que le PV pourrait permettre de remplacer.

D'après un récent comparatif de l'ACV des panneaux solaires, si l'on considère que la durée de vie d'un panneau solaire nanocristallin à colorant est de 20 ans, les émissions de GES en équivalent dioxyde de carbone engendrées par kilowattheure sont à peu près équivalentes à celles des panneaux amorphes (couches minces) et polycristallins de silicium, et inférieures à celles des panneaux monocristallins. Mais pour une durée de vie de 5 ans, en revanche, ce sont les émissions par kWh des cellules nanocristallines qui sont les plus élevées. Un groupe de chercheurs a récemment présenté une étude suggérant que les besoins énergétiques sur l'ensemble du cycle de vie des panneaux solaires organiques à base de nanos sont inférieurs à ceux des panneaux non organiques (Science Daily 2010). Ce travail n'a toutefois pas encore été publié, et rares sont les éléments disponibles à son sujet.

Par contraste, une étude parue dans le *Journal of Cleaner Production*, qui évaluait les exigences et performances environnementales des cellules nanotechnologiques à colorant et des cellules organiques aux fullerènes, a conclu qu'elles n'étaient absolument pas plus écologiques que les cellules au silicium pour les raisons suivantes : forte consommation d'énergie et de matières premières lors de la production de nanoparticules ; rendement de conversion relativement faible du rayonnement solaire en électricité ; durée de vie effective relativement courte ; emploi de métaux assez rares dont le taux de recyclage est plutôt faible comparé à celui de la cellule solaire multicristalline au silicium actuellement en tête du marché. En outre, le manque de données et l'inadaptation des méthodes actuelles au traitement des risques associés aux nanoparticules rend problématique la réalisation d'ACV comparatives des cellules solaires nanoparticulaires (Reijnders 2010, 307).

Reijnders (2010) fait observer que « le travail effectif de développement en matière de nanotechnologies PV ne semble guère centré sur l'obtention d'améliorations du bilan écologique (net). C'est une vraie différence avec l'attention portée à cette amélioration dans la mise au point d'autres types de cellules solaires ». Voilà qui contredit clairement les affirmations des fabricants de photovoltaïque nanotechnologique qui promettent de créer des solutions « vertes » pour la production d'électricité.

Des inquiétudes concernant le risque de toxicité en fin de vie des nanocomposants utilisés dans les cellules solaires – du cadmium en particulier – ont incité First Solar Inc. à s'engager dans un

programme de récupération de ses panneaux en fin de vie. L'initiative est louable, bien qu'elle ne constitue pas la norme dans ce secteur. Certains chercheurs préviennent même que, le recyclage des panneaux PV n'étant guère rentable, les initiatives volontaires ne suffisent pas (McDonald et Pearce 2010). Selon eux, les initiatives volontaires seront confrontées dans l'avenir à des tensions économiques et, à moins que le recyclage devienne obligatoire, des matériaux dangereux se retrouveront inévitablement dans les flux de déchets locaux.

Concernant le solaire thermique, le stade encore très précoce des recherches sur l'emploi de nanomatériaux fait qu'aucune analyse de cycle de vie n'est encore disponible.

Risques pour la santé et l'environnement

Quantité de nanomatériaux employés en photovoltaïque contiennent des métaux lourds et posent les problèmes de toxicité inhérents à ceux-ci. First Solar, qui domine le marché du photovoltaïque en couches minces, utilise du tellure de cadmium. D'autres applications en cours de mise au point font appel à des boîtes quantiques dotées de noyaux en cadmium. Des études initiales suggèrent que les boîtes quantiques pourraient passer dans la chaîne alimentaire, faire l'objet d'une bioaccumulation, voire d'une bioamplification, et que, avec le temps, leurs revêtements pourraient se dégrader, dénudant les noyaux toxiques (voir plus loin la section santé et environnement).

L'Institut de Wuppertal pour le climat, l'environnement et l'énergie, un organisme de recherche allemand qui travaille sur la durabilité, avance que, même si des filières de recyclage sont instaurées, les inquiétudes persistantes quant aux effets nocifs du cadmium sur la santé devraient amener à l'exclure totalement de toute fabrication photovoltaïque.

Les risques sanitaires des nanotubes de carbone, et en particulier leur aptitude à causer des mésothéliomes et d'autres maladies similaires à celles que provoque l'amiante, suscitent aussi de grandes craintes au plan international (voir section santé et environnement). Selon toute probabilité, ces risques seront plus aigus pour les travailleurs exposés durant leur fabrication. La forme des nanotubes de dioxyde de titane est analogue à celle des nanotubes de carbone. Une étude *in vitro* sur des cellules épithéliales pulmonaires a trouvé un fort effet dépendant de la dose sur la prolifération et la mort cellulaires (Magrez et al. 2009).

Des études préliminaires montrent aussi que les nanoformes de dioxyde de titane et d'argent, ainsi que les fullerènes de carbone, tous préconisés pour une utilisation dans le solaire, peuvent être toxiques pour les humains et l'environnement (voir section santé et environnement).

La Silicon Valley Toxics Coalition a fourni un excellent rapport détaillé sur d'autres aspects toxiques de l'industrie photovoltaïque (Silicon Valley Toxics Coalition 2009).

Nanotechnologies et énergie éolienne

Résumé

Les besoins en énergie de la fabrication des nanofibres et nanotubes de carbone qui servent à renforcer les pales d'éoliennes sont bien plus élevés que ceux des matériaux classiques. Les premières analyses de cycle de vie montrent que, même si les nanocomposites peuvent alléger les pales et prolonger leur durée d'utilisation, il n'est pas sûr qu'ils réduisent les consommations énergétiques rapportées à l'ensemble du cycle de vie, et ils pourraient même les accroître. Dans des contextes où la durée de vie des éoliennes (ou aérogénérateurs) peut être très amoindrie (comme en mer, ou par grands froids), des nanorevêtements pourraient la prolonger. Mais on ne dispose encore d'aucune analyse de cycle de vie sur les conséquences énergétiques du recours à des nanorevêtements. Les effets sur la santé des nanotubes de carbone, dont l'usage est prôné dans la fabrication de nanocomposites pour pales et revêtements d'éoliennes, suscitent de graves inquiétudes. Des études ont montré que certaines formes de nanotubes de carbone provoquent des mésothéliomes, le redoutable type de cancer jusqu'ici associé à l'amiante.

Contexte

La force du vent permet de produire de l'électricité en faisant tourner des pales – d'ordinaire en fibre de verre ou en aluminium et assez semblables aux hélices d'avion – qui mettent elles-mêmes en mouvement des turbines génératrices d'électricité (généralement regroupées en parcs éoliens). D'après le Global Wind Energy Council, la capacité éolienne mondiale a dépassé les 120 GW en 2008 (Pullen, Liming et Sawyer 2008) et elle produit plus de 1,5 % de l'électricité mondiale (World Wind Energy Association 2009).

L'énergie du vent passe pour une des méthodes de production électrique les plus inoffensives pour l'environnement. Elle pourrait assurer 10 à 12 % de la demande d'électricité mondiale d'ici à 2020. En 2008, l'éolien permettait déjà d'éviter 158 millions de tonnes de CO₂ par an – ce que l'on obtiendrait en retirant des routes 27 millions de voitures américaines ou 40 millions de voitures australiennes (Pullen, Liming et Sawyer 2008).

Comment les nanotechnologies sont-elles censées améliorer les technologies existantes ?

Certains chercheurs tentent de recourir aux nanotechnologies pour créer des pièces d'éoliennes plus robustes, plus légères et plus durables. Des nanorevêtements sont en cours de mise au point pour protéger les pales et accroître leur durée d'utilisation. L'emploi de lubrifiants aux nanoparticules est aussi étudié pour réduire le frottement et augmenter la durée de service des divers éléments. D'autres chercheurs ont commencé à travailler sur l'utilisation de nanoparticules pour détecter des défauts ou dégâts sur les aérogénérateurs.

Où les nanotechnologies sont-elles employées ?

Les nanotubes de carbone – des cylindres 10 000 fois plus fins qu'un cheveu, constitués d'atomes de carbone – sont un des nanomatériaux qui ont reçu le plus de publicité. Ce sont les plus rigides et les plus robustes des fibres connues, et ils possèdent aussi des propriétés électriques particulières. La firme finlandaise Eagle Windpower Oy a utilisé des nanotubes de carbone liés à l'époxy dans de petites éoliennes (Understanding Nano.com 2009). D'après cette firme, cela réduit d'environ 50 % le poids de ses pales par rapport aux pales concurrentes en fibre de verre, et elles peuvent commencer à fonctionner à des vitesses de vent aussi faibles que 2 à 2,5 mètres par seconde. L'entreprise affirme que ce recours aux nanotubes permet de doubler la taille des pales, ce qui accroît de 30 % la production d'électricité.

Allonger les pales d'éoliennes augmente en effet la quantité d'électricité qu'elles peuvent fournir. Les plus grandes atteignent 60 mètres de long. Les limites des plastiques renforcés à la fibre de verre ont toutefois été atteintes dans ce domaine, et l'on se heurte maintenant à un problème de matériaux pour arriver à des aérogénérateurs plus grands et plus résistants. Un matériau hybride est en cours de mise au point, qui utilise des nanofibres de carbone formées par croissance en phase vapeur pour renforcer l'interface d'une matrice en époxy et fibre de verre (Meregula, Khanna et Bakshi 2010). Cela pourrait renforcer et alléger les pales, bien que ce matériau se heurte encore à plusieurs défis mécaniques.

Le Royaume-Uni a lancé un projet éolien off-shore d'un montant total de 100 milliards de livres (environ 156 milliards de dollars), qui comportera de très grandes machines. L'ensemble est censé produire près du tiers de l'énergie du pays d'ici à 2020 (Babbage 2010). Cependant, la rudesse des conditions météorologiques en mer peut aisément endommager les éoliennes off-shore (Hayman, Wedel-Heinen et Brondsted 2008).

Certaines firmes se tournent vers les nanotechnologies pour créer des revêtements imperméables afin d'éviter que glace ou moisissures ne se forment sur les éoliennes, ce qui permettrait d'accroître leur production d'électricité (General Electric 2009). Les revêtements nanotechnologiques pourraient également prolonger la durée d'exploitation des pales soumises à des conditions climatiques difficiles, comme en mer.

Des lubrifiants à l'échelle nanométrique sont aussi en cours de mise au point. Ils agiraient comme de petits roulements à bille. Les chercheurs espèrent qu'ils réduiront la friction et l'usure dans les turbines,

ce qui en améliorerait le rendement et la durée de vie.

Commercialisation

Les nanomatériaux semblent peu répandus sur le marché de l'éolien même si, en l'absence d'obligation d'étiquetage sur les nanomatériaux utilisés dans les composites, revêtements et lubrifiants, il est difficile d'en avoir la certitude.

Eagle Windpower Oy emploie des nanotubes de carbone pour renforcer et alléger ses pales de petites éoliennes. Cette firme produit des éoliennes de taille assez réduite pour un usage domestique (200 à 500 kW). Elle déclare participer à plusieurs projets dans des pays en développement, et être en cours de négociations avec une compagnie électrique finlandaise pour fournir de l'électricité à partir de ses stations-service (Understanding Nano.com 2009).

Les nanotubes de carbone Baytubes© fabriqués par Bayer AG sont actuellement commercialisés pour renforcer les éoliennes et permettre la mise en œuvre de plus grandes pales de rotor (Bayer AG 2009). Bayer assure que « la conception légère des nanotubes – et donc des matériaux hybrides dans lesquels ils sont incorporés – booste le rendement du processus de conversion du vent en électricité » (Bayer AG 2009).

Les nanotechnologies tiennent-elles leurs promesses ?

Selon une récente analyse de cycle de vie de pales d'éoliennes renforcées aux nanofibres de carbone, le coût énergétique de la fabrication des nanofibres est si énorme que, même si le recours à des composites à nanofibres peut réduire le poids des pales et améliorer leur résistance, il est douteux que cela se solde par des économies d'énergie sur l'ensemble du cycle de vie (Merugula, Khanna et Bakshi 2010). Les auteurs font en outre observer que l'emploi de nanofibres pourrait poser des problèmes mécaniques : « l'allègement obtenu avec les nanofibres de carbone (NFC) pourrait implicitement supposer des pales amincies à un degré prohibitif » (Merugula, Khanna et Bakshi 2010).

Il reste encore à mettre au point des nanodétecteurs efficaces. On espère qu'ils pourraient révéler de très petites fissures dans les éoliennes, et d'autres défauts de fabrication potentiels. Le NREL (National Renewable Energy Laboratory), une section du DOE, le ministère américain de l'énergie, a testé plusieurs formes de nanotubes de carbone, dont le *buckypaper* ou feuille de buckyballes, pour créer des « neurones » qui pourraient théoriquement déceler des tensions et fractures dans divers matériaux servant à la construction d'éoliennes. Le NREL fait toutefois remarquer qu'il existe des obstacles pratiques considérables : le *buckypaper* s'est révélé « cassant et difficile à appliquer sur de grandes structures » (Schulz et Sundaresan 2006).

Il est possible que des nanolubrifiants se révèlent utiles pour réduire les frottements et protéger les rouages d'éoliennes. Néanmoins, plusieurs huiles à hautes performances sans nanos semblent d'ores et déjà fort bien remplir cette fonction (Siebert et Holm 2009).

Durabilité et cycle de vie

On ne sait trop s'il y aurait un réel gain énergétique à utiliser des nanomatériaux tels que les nanotubes (CNT) ou les nanofibres (CNF) de carbone pour renforcer les pales d'aérogénérateurs. Selon une première étude d'ACV, le cycle de vie complet de pales aux CNF serait de 1,4 à 7,7 fois plus énergivore qu'avec des matériaux classiques (Merugula, Khanna et Bakshi 2010). Ces auteurs ont découvert que les économies d'énergie dépendent de variables telles que le processus de fabrication, le maniement des solvants et la quantité de nanofibres de carbone utilisées. Si les pales aux CNF procurent effectivement un gain en matière de poids et une durée de vie accrue, les économies d'énergie potentielles sur l'ensemble du cycle de vie vont d'insignifiantes à notables. Il se pourrait toutefois qu'existent des limites pratiques à l'utilisation de matériaux hybrides aux CNF. Les chercheurs concluent que « tant du point de vue mécanique qu'énergétique, il n'est pas encore prouvé que le remplacement des fibres de carbone longues soit avantageux ».

Il faudra des ACV ultérieures pour établir si les gains de performance et d'efficacité associés à des

pales plus légères renforcées aux nanomatériaux sont ou non suffisants pour compenser le coût énergétique important de leur fabrication.

Risques pour la santé et l'environnement

Les risques sanitaires associés aux nanotubes de carbone, et en particulier leur aptitude à causer des mésothéliomes et des maladies analogues à celles qu'engendre l'amiante, sont un sujet de grande préoccupation au niveau international (voir plus loin la section sur environnement et santé).

Nanotechnologies et énergie hydrogène

Résumé

Les rêves d'un avenir alimenté en énergie par l'hydrogène, où les voitures n'émettraient que de la chaleur et de l'eau, ont séduit aussi bien des environmentalistes que des technophiles et des personnalités politiques. Il n'empêche que, dans les faits, les voitures qui roulent aujourd'hui à l'hydrogène tirent leur énergie de carburants fossiles et que leurs émissions de gaz à effet de serre sont plusieurs fois supérieures à celles de leurs homologues à l'essence.

L'hypothèse d'une économie basée sur l'hydrogène bute sur plusieurs obstacles majeurs, en termes techniques, écologiques et de sûreté. Ses adeptes espèrent que les nanotechnologies pourront augmenter l'efficacité et la rentabilité de la production d'hydrogène par des énergies renouvelables, fournir de nouveaux moyens pour stocker l'hydrogène, accroître la capacité et le rendement des piles à combustibles à hydrogène tout en réduisant leur coût. Mais les avancées en la matière n'en sont qu'à un stade très préliminaire.

Il est douteux que des automobiles roulant à l'hydrogène issu de sources renouvelables soient très répandues dans un avenir proche. Il est donc très improbable que des voitures roulant à l'hydrogène contribuent de manière significative à la réduction des émissions de gaz à effet de serre au cours des dix ou vingt prochaines années – période où ces réductions sont pourtant cruciales. En attendant, la mise au point de véhicules à l'hydrogène renforce notre dépendance aux énergies fossiles pour le produire. De surcroît, les investissements colossaux nécessaires aux recherches dans ce domaine et à la réalisation des infrastructures relatives à l'énergie hydrogène peuvent entraîner un dangereux coût d'opportunité, puisqu'ils se font au détriment des mesures importantes que nous devrions prendre pour améliorer les transports en commun et réduire notre dépendance à l'égard des véhicules individuels.

Remplacer les carburants automobiles du Royaume-Uni par de l'hydrogène obtenu par électrolyse absorberait plus que l'actuelle consommation d'électricité du pays (Fauset 2008). Il paraît hautement improbable qu'à court terme, les nanotechnologies permettent une augmentation suffisante du rendement des énergies renouvelables et une diminution assez forte de leur coût pour permettre un doublement de la consommation électrique par le seul recours aux renouvelables.

Contexte

L'« économie hydrogène » est une économie d'avenir hypothétique où l'hydrogène serait la forme principale du stockage d'énergie pour les véhicules et les applications industrielles (Elcock 2007). En 2007, George W. Bush, alors président des Etats-Unis, a annoncé un financement public de 1,7 milliards de dollars pour un projet sur cinq ans de développement de piles à combustible à hydrogène, d'infrastructures correspondantes et de technologies automobiles de pointe (Berger 2007a). A l'époque, il avait déclaré qu'en 2020, le choix de véhicules propres, alimentés par des piles à combustible à hydrogène, serait commode et rentable pour un grand nombre d'Américains. Quant au Programme hydrogène du département américain de l'Energie (US DOE), il prévoit qu'en 2015, un niveau suffisant de faisabilité technique sera atteint pour permettre aux industriels d'envisager la commercialisation. Pourtant, malgré les prédictions très optimistes et sans doute irréalisables de George W. Bush et du DOE, la mise en place future d'une économie hydrogène se heurte à plusieurs

contraintes quasi rédhibitoires en matière de technique, d'infrastructures, d'économie et de sécurité.

Un des problèmes les plus fondamentaux est que la production d'hydrogène repose sur des carburants fossiles. L'hydrogène n'est pas une source d'énergie à part entière mais (comme l'électricité) un simple vecteur. Pour le fabriquer, il faut une source d'énergie primaire (charbon, gaz...) ou bien de l'électricité elle-même issue de sources primaires. On peut obtenir de l'hydrogène en utilisant comme matière première des hydrocarbures, ce qui suppose de séparer par craquage l'hydrogène des composants carbonés. On peut aussi produire l'hydrogène à partir d'eau, en séparant par électrolyse l'hydrogène de l'oxygène. Cela nécessite de l'électricité. Les besoins électriques pour remplacer les véhicules à essence par des véhicules roulant à l'hydrogène produit par électrolyse seraient colossaux (voir encadré). Du reste, le Plan hydrogène américain (*Hydrogen Posture Plan*) envisage clairement une production d'hydrogène basée sur les carburants fossiles (US DOE, US DOT 2006).

Un autre obstacle à l'adoption à grande échelle de l'hydrogène comme carburant réside dans le coût élevé et le très faible rendement des piles à combustible qui convertissent l'hydrogène et l'oxygène en électricité, chaleur et eau. Les défis techniques de la mise au point des piles à combustible sont considérables. Celles pour véhicules à hydrogène ont vu se multiplier les promesses non tenues par les industriels. En 2004, IBM prévoyait que, dès 2010, les piles à combustible dans les voitures « feraient partie de la vie courante » et General Motors estimait qu'il produirait d'ici là 1 million de véhicules à piles à combustible (Elcock 2007). Aucune de ces prévisions ne s'est réalisée.

A la nécessité d'éviter le recours aux carburants fossiles pour produire l'hydrogène s'ajoute le problème crucial du stockage. Il faut en gros 1 kg d'hydrogène pour faire 100 km. Pour une autonomie de 500 km, cela suppose de stocker 50 000 litres d'hydrogène dans un réservoir de voiture (Berger 2007a). On peut le faire de trois manières : sous forme de gaz comprimé à haute pression, de liquide cryogénique, ou sous forme solide. Pour être liquéfié, l'hydrogène doit être refroidi à -253 °C : l'énergie pour ce faire équivaut à 30 à 40 % de l'énergie qu'il contient (Fauset 2008). Le gaz comprimé requiert moins d'énergie, mais son rendement est bien moindre. Tant l'hydrogène comprimé que l'hydrogène liquéfié présentent un risque d'explosion, et de fuites non détectées (voir plus loin).

Le manque de capacités de stockage sûres, le risque d'explosion lié au transport et au stockage à haute pression de l'hydrogène, ainsi que les dépenses probablement prohibitives que nécessiteraient ses infrastructures de distribution constituent autant d'obstacles à son utilisation comme carburant (Berger 2007a ; Fauset 2008). Ainsi, le coût des infrastructures pour n'alimenter en hydrogène que 40 % des véhicules légers des Etats-Unis a été évalué à plus de 500 milliards de dollars (Fauset 2008).

Comment les nanotechnologies sont-elles censées améliorer les technologies existantes ?

L'intérêt porté à l'application des nanotechnologies au secteur de l'hydrogène repose surtout sur des recherches très préliminaires ou de laboratoire. Un rapport de l'ONU, l'université des Nations unies, a suggéré que, dans l'avenir, les nanotechnologies pourraient contribuer à rendre possible une économie hydrogène par des applications dans les domaines suivants : l'hydrogène comme source d'énergie ; la production d'hydrogène par électrolyse ; la production d'hydrogène par photolyse ; les piles à combustible à hydrogène pour les transports (voitures, autobus...) ; le stockage de l'hydrogène ; les hydrures de métaux légers ; le stockage en nanotubes de carbone ; les éponges moléculaires (Esteban et al. 2008).

Les domaines essentiels de recherche concernent l'utilisation de nanotechnologies pour : améliorer la viabilité économique de la production d'hydrogène à partir de renouvelables ; accroître la capacité du stockage d'hydrogène et sa praticité ; augmenter le rendement des piles à combustible et en réduire le coût (Berger 2007a). On parle beaucoup de recourir aux nanotechnologies solaires pour faire baisser le coût de la production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables et en améliorer le rendement (Berger 2007a ; US DOE, US DOT 2006 ; NREL 2009). Le département américain de l'Énergie laisse entendre que les nanotechnologies seraient cruciales pour qu'il devienne rentable de faire jouer un rôle aux énergies renouvelables dans la production d'électricité nécessaire pour tirer l'hydrogène de l'eau (US DOE, US DOT 2006).

Certains chercheurs étudient aussi la possibilité d'utiliser des nanomatériaux pour stocker l'hydrogène,

et d'employer des batteries nanotechnologiques comme fondement de réseaux d'énergies renouvelables ou sources d'énergie complémentaires dans des voitures à hydrogène (Esteban et al. 2008 ; Nanowerk 2007). Le principal rôle des nanotechnologies pourrait sans doute intervenir dans la mise au point de piles à combustible, des dispositifs électrochimiques qui convertissent directement en électricité un carburant tel que l'hydrogène ou le méthanol (Esteban et al. 2008).

Où les nanotechnologies sont-elles utilisées ?

On a vu plus haut les applications des nanotechnologies au domaine de l'énergie solaire, et les évolutions en matière de batteries nanotechnologiques, dont celles au lithium ionique, seront abordées dans un sous-chapitre à part.

Un des domaines techniques où les chercheurs espèrent que les nanotechnologies permettront une avancée est celui des cellules photovoltaïques pour alimenter l'électrolyse de l'eau en hydrogène. Des expériences avec des assemblages de nanofils et d'autres matériaux nanostructurés ont indiqué qu'ils augmentent ce rendement (Berger 2007a).

La société suisse Hydrogen Solar a mis au point une Tandem Cell™ dont elle espère qu'elle finira par fournir l'hydrogène pour faire fonctionner des véhicules et des raffineries ainsi que des équipements industriels et domestiques (Hydrogen Solar n.d.). La Tandem Cell™ est conçue pour alimenter directement à l'énergie solaire l'électrolyse qui produit l'hydrogène. La première cellule absorbe les ultraviolets à haute énergie et la lumière bleue du soleil au moyen de fines couches d'oxyde métallique nanocristallin pour produire des paires électron-trou. La lumière de plus grande longueur d'onde, du vert au rouge, traverse cette première cellule pour être absorbée dans une cellule Grätzel, qui produit un potentiel électrique dans presque toutes les conditions d'éclairage. Ensemble, ces cellules fournissent le potentiel requis pour scinder les molécules d'eau de l'électrolyte. Pour l'instant, le rendement de cette double cellule est très faible (3 %) ; la société reconnaît devoir « également optimiser tous les autres aspects, notamment les contre-électrodes, les électrolytes et la conception mécanique » (Hydrogen Solar n.d.).

Les chercheurs essaient par ailleurs de mettre au point des nanomatériaux aptes à stocker de grandes quantités d'hydrogène dans un espace restreint tout en minimisant le risque d'explosion. Parmi les nanomatériaux sur lesquels ils travaillent figurent des hydrures de métal et des hydrures chimiques comme le borane d'ammoniaque, auquel on peut lier chimiquement l'hydrogène (Davis et al. 2009). L'hydrogène peut aussi être lié physiquement à des nanotubes de carbone ou des nanoclusters de métal (Elcock 2007), ou encore être fixé à des nanotubes de carbone par des liaisons hydrogène réversibles (Nikitin et al. 2008). L'hydrogène stocké peut ensuite être libéré par de la chaleur, de l'électricité ou une réaction chimique. En se basant sur une modélisation statistique, certains chercheurs prévoient qu'utiliser des nanotubes de carbone pour stocker l'hydrogène permettra peut-être un jour de faire rouler une automobile ou un autobus avec une batterie à hydrogène de la taille d'un porte-document (The X-Journals 2009).

Des chercheurs étudient aussi la possibilité d'accroître avec des nanomatériaux le rendement des piles à combustible qui produisent de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène, tout en réduisant leur coût (Cientifica 2007a). La fabrication des piles à combustible peut être onéreuse, notamment du fait des électrodes au platine qu'elles comportent (Berger 2007a). Employer des nanoparticules de platine à la place de particules plus grosses augmente la réactivité : plus la taille des particules diminue, plus leur surface relative augmente, exposant davantage d'atomes réactifs. Accroître la réactivité du platine permettrait d'en utiliser moins, et donc potentiellement de réduire les coûts de production. Des équipes examinent également s'il serait ou non possible d'utiliser à la place du platine des catalyseurs nanométriques de métaux non précieux (Berger 2006).

Commercialisation

Il ne semble pas que l'hydrogène destiné à un usage comme combustible soit actuellement produit, stocké ou converti à l'aide de nanomatériaux en dehors des laboratoires, bien que là encore, cela soit très difficile à vérifier. Honda propose en location 200 modèles de sa voiture à hydrogène FCX Clarity

(American Honda Motor Co., Inc. 2010). Ces véhicules contiennent des batteries lithium-ion qui intègrent certains nanocomposants. La batterie sert à fournir une source d'électricité complémentaire de celle de la pile à combustible à hydrogène (Esteban et al. 2008).

Ces voitures à piles à combustible à hydrogène sont encore peu commercialisées. Les problèmes de création d'infrastructures pour les stations-service d'hydrogène, de coûts et de sécurité sont récurrents et considérables. Quelques modèles existent toutefois en quantité limitée, notamment la BMW H7. Par ailleurs, VW, Nissan et Hyundai/Kia ont également mis en circulation des prototypes de véhicules à piles à combustible.

Les nanotechnologies tiennent-elles leurs promesses ?

Le seul moyen d'éviter que des voitures roulant à l'hydrogène émettent des GES, c'est de produire l'hydrogène par électrolyse de l'eau, avec exclusivement de l'électricité renouvelable, et ce à condition que le processus ultérieur de liquéfaction, très énergivore, soit aussi alimenté uniquement par des renouvelables. Or Corporate Watch avertit que produire de l'hydrogène avec de l'électricité requiert beaucoup plus d'énergie que le produire à partir de charbon ou de gaz.

Michael Berger, du portail d'information Nanowerk, fait observer que le « Saint Graal » de la recherche en nanotechnologies « serait un appareil à haut rendement qu'on remplit d'eau, qu'on met au soleil, et qui fournit de l'hydrogène sans utiliser aucune autre source extérieure d'énergie » (Berger 2007a). Cependant, les obstacles techniques auxquels sont confrontés les fabricants qui tentent de commercialiser des panneaux solaires nanotechnologiques à couches minces pour les toits laissent à penser qu'un tel appareil restera impossible à réaliser dans un avenir prévisible.

La mise au point de panneaux utilisant le rayonnement solaire pour alimenter directement en énergie la production d'hydrogène à partir d'eau constituerait déjà un énorme pas en avant. Ces recherches n'en sont toutefois qu'à un stade très précoce. Les rendements obtenus jusqu'ici sont très bas (3 %), et les chercheurs reconnaissent qu'il faudra encore beaucoup de travail et d'améliorations techniques.

Il apparaît aussi douteux que les nanotechnologies puissent résoudre les graves problèmes de sécurité qui ont affecté les prototypes de voitures à hydrogène et qui font du stockage, de la distribution et de l'utilisation d'hydrogène comme carburant un danger public majeur (voir plus loin).

Durabilité et cycle de vie

Certains chercheurs espèrent que les nanotechnologies contribueront à réduire la quantité de platine nécessaire aux piles à combustible, mais la rareté du platine n'en constitue pas moins une entrave à la généralisation de ces piles. On estime que si 500 millions de véhicules étaient ré-équipés avec des piles à combustible, les pertes de platine (par dissipation dans les gaz d'échappement) suffiraient à épuiser toutes les réserves mondiales de platine en quinze ans (Cohen 2007).

Les principaux problèmes de durabilité écologique et de cycle de vie sont dus à la manière dont on produit l'hydrogène avant de concerner les nanomatériaux eux-mêmes. Même si des nanomatériaux permettent d'améliorer le stockage d'hydrogène et le fonctionnement des piles à combustible, tant que l'hydrogène restera produit à partir d'hydrocarbures, il ne fera qu'aggraver les émissions de gaz à effet de serre liées à l'usage de véhicules individuels.

Le plus gros de l'hydrogène actuellement produit aux Etats-Unis est issu de méthane ou gaz naturel (NREL 2009). Le problème quand on utilise du méthane à cette fin, c'est qu'une fois séparé de l'hydrogène, le carbone part dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone. Selon le GIEC, même dans une grande usine moderne, la production d'hydrogène à partir de gaz naturel émet 9,1 kg de dioxyde de carbone par kilo d'hydrogène (GIEC 2005). De surcroît, le gaz naturel n'est pas une source d'énergie renouvelable (Oil and Gas Accountability Project n.d.).

Selon Corporate Watch, la production d'hydrogène à partir d'électricité et sa compression ou sa liquéfaction pour l'utiliser comme carburant automobile – principale application envisagée – pourrait avoir sur le climat un impact encore pire que l'utilisation d'essence, sauf à reposer exclusivement sur des énergies renouvelables (Fauset 2008). Ainsi, faire rouler la BMW à hydrogène avec de

l'hydrogène extrait à partir de l'eau avec l'électricité du réseau britannique générerait des émissions environ quatre fois supérieures à celles de son homologue à l'essence. Alimenter la même voiture avec de l'hydrogène produit à partir de gaz naturel (méthane) engendrerait encore environ deux fois et demie plus d'émissions qu'une BMW équivalente à l'essence, et environ six fois plus qu'une Toyota Prius (Fauset 2008).

Des analystes suisses de l'énergie préviennent que la production d'hydrogène à l'électricité sur le site de stations-service d'hydrogène exigerait une multiplication par trois à cinq des capacités de production électrique. La production d'une centrale électronucléaire de 1 000 MW serait nécessaire pour alimenter vingt à trente stations-service d'hydrogène sur les autoroutes européennes les plus fréquentées (Bossel et Eliasson 2003).

Berger fait ainsi observer : « Alors que les politiques et les industriels du secteur de l'énergie nous parlent d'un avenir propre grâce à l'économie hydrogène, la feuille de route de l'énergie hydrogène du département américain de l'Énergie prévoit que jusqu'à 90 % de la production d'hydrogène sera issue de sources fossiles (charbon, gaz, pétrole), le reste provenant surtout de centrales nucléaires » (Berger 2007a).

Sécurité sanitaire et environnementale

Les principales menaces sanitaires et environnementales relatives au recours aux nanotechnologies dans le secteur de l'hydrogène sont liées à l'hydrogène lui-même. Un danger majeur reste celui des fuites. L'hydrogène étant le plus petit des éléments, il s'échappe plus facilement des réservoirs et conduites que les carburants classiques (Elcock 2007). Or il est incolore, inodore et extrêmement inflammable. La combustion d'hydrogène étant invisible, le risque de feu non détecté s'ajoute à celui de fuites. Corporate Watch avertit qu'un violent incendie d'hydrogène pourrait être indétectable, sauf à y prendre feu en se retrouvant soudain au milieu (Fauset 2008).

L'hydrogène est inflammable à des concentrations très variées, et l'énergie requise pour son ignition est vingt fois inférieure à celle du gaz naturel ou de l'essence (Fauset 2008). Un rapport commandité par le département américain de l'Énergie mettait en garde contre le fait que le fonctionnement d'appareils électroniques comme les téléphones mobiles peut provoquer l'ignition, et que la banale électricité statique (produite en glissant sur un siège automobile, par exemple) représente à peu près dix fois ce qui suffit pour enflammer l'hydrogène (Arthur D. Little, Inc. 2002).

En 2003, Toyota a dû rappeler ses prototypes de voitures à l'hydrogène en raison de problèmes de fuites détectés par les conducteurs (Fauset 2008). Des voitures comme la FCX de Honda ont été équipées de détecteurs de fuites sophistiqués (Esteban et al. 2008), mais la possibilité de fuites non décelées dans les stations-service d'hydrogène n'en reste pas moins inquiétante : on ne dispose d'aucune méthode fiable de détection à grande échelle. Jusqu'en 2005, les directives de sécurité de la NASA concernant le maniement de l'hydrogène recommandaient, pour détecter les fuites des réservoirs d'hydrogène, d'envoyer quelqu'un en faire le tour en poussant un balai devant soi pour voir si les poils prenaient feu (§ 601b(4) ; NASA, Office of Safety and Mission Assurance 1997).

Des spécialistes de l'énergie ont aussi prévenu que, même si l'acheminement d'hydrogène par gazoduc risque d'avoir un mauvais rendement énergétique, et de se solder par des fuites importantes, la livraison massive d'hydrogène par la route poserait de graves problèmes de sécurité. L'hydrogène comprimé a un contenu énergétique si faible qu'il faudrait quinze fois plus de camions-citernes pour son transport que pour celui de l'essence. Des analystes suisses prédisent qu'un accident sur sept impliquant des camions concernerait un camion d'hydrogène, et qu'une collision sur sept entre deux camions interviendrait entre deux camions d'hydrogène (Bossel et Eliasson 2003).

L'utilisation, dans les piles à combustible à hydrogène, de nanomatériaux comme les nanotubes de carbone comporte aussi des problèmes spécifiques pour la santé et l'environnement. Les risques sanitaires liés à l'aptitude des nanotubes de carbone à provoquer, entre autres, des mésothéliomes et des maladies similaires à celles causées par l'amiante sont une source majeure de préoccupations internationales (voir le chapitre sur santé et environnement).

Les nanotechnologies pour augmenter l'extraction de pétrole et de gaz

« On a trouvé pratiquement tout le pétrole et le gaz faciles à extraire dans le monde. Maintenant, il faut s'atteler au défi de trouver et produire du pétrole dans des environnements de travail plus complexes. »

William J. Cummings, porte-parole de la société Exxon-Mobil, décembre 2005 (Donnelly 2005)

« Les nanotechnologies ouvrent des possibilités formidables à l'industrie pétrolière et gazière, et constituent notre meilleur espoir d'accroître la durée de vie de nos ressources énergétiques actuelles. Les nanotechnologies apportent nombre de solutions pour cartographier de nouveaux gisements, pour tirer plus de pétrole des puits existants, et pour rendre notre usage des carburants plus propre et plus respectueux de l'environnement. »

Nano Petroleum, Gas and Petrochemicals Industries Conference 2009 (SabryCorp., n.d.a.)

Résumé

Les plus grosses compagnies pétrochimiques du monde se sont associées pour financer de la recherche-développement visant à utiliser des nanotechnologies pour doubler la quantité de pétrole et de gaz pouvant être extraite des réserves connues, et découvrir de nouveaux gisements. Des recherches analogues bénéficient de financements publics en Australie, au Mexique, aux Etats-Unis, au Royaume-Uni, au Japon, en Arabie Saoudite et ailleurs. Identifier de nouvelles réserves, doubler les quantités extraites des gisements exploités et rendre économiquement viable l'exploitation de ceux qui ne sont aujourd'hui pas assez rentables se traduirait inévitablement par une hausse massive des émissions de gaz à effet de serre. Le coût écologique serait exacerbé par les quantités colossales de nanomatériaux qu'il est prévu d'utiliser pour ces nouvelles techniques de récupération assistée du pétrole (RAP ; en anglais EOR, *Enhanced Oil Recovery*). Les nanotechnologies pourraient aussi entraîner l'ouverture de nouveaux sites de forage dans des zones actuellement inexploitées. Des régions telles que l'Arctique, l'Amazonie, le Congo et d'autres, qui ont une grande valeur écologique et sont habitées par des peuples indigènes, ont été en partie préservées par la faible rentabilité d'une exploitation de leurs réserves pétrolières. Elles pourraient se retrouver menacées par l'extension des forages si les nanotechnologies permettent de récupérer davantage de pétrole et en réduisent le coût d'extraction.

Contexte

Les observateurs du secteur des hydrocarbures ont prévenu que nous approchons du taux maximum d'extraction pétrolière – ce qu'on appelle le pic pétrolier –, après quoi nous serons confrontés à un écart permanent et croissant entre l'offre et la demande. Début 2010, le groupe de travail de l'industrie britannique sur le pic pétrolier et la sécurité énergétique a averti que le Royaume-Uni pourrait être déstabilisé dès 2015 par des pénuries de pétrole et une instabilité de l'offre et des prix (Industry Taskforce on Peak Oil and Energy Security 2010).

De nombreux écologistes – et même quelques membres du groupe de travail britannique – ont accueilli l'approche du pic pétrolier par des appels à passer à des modes de production et de consommation moins énergivores, et à développer et déployer rapidement les énergies renouvelables. Mais certains gouvernements, dont ceux du Mexique et de l'Arabie Saoudite, ont annoncé très officiellement que le recours aux nanotechnologies pour extraire davantage de pétrole et de gaz faisait partie de leurs principales priorités stratégiques en matière de recherche (IEA 2009 ; Kingdom of Saudi Arabia 2007). Investir dans de nouvelles technologies de récupération assistée pour extraire davantage de pétrole est aussi une des priorités stratégiques majeures du département de l'Energie américain (US DOE n.d.a.), ce qui inclut la recherche nanotechnologique (Karoub 2004). Les recherches sur ce type d'usage des nanotechnologies bénéficient également de fonds publics au

Royaume-Uni (UK EPSRC n.d.), en Australie (via le CSIRO, organisation du Commonwealth pour la recherche scientifique et industrielle ; CSIRO n.d.a. ; CSIRO n.d.b.) et au Japon (Endo et al. 2008).

Comment les nanotechnologies sont-elles censées améliorer les technologies existantes ?

L'industrie pétrolière et les investisseurs publics espèrent que des détecteurs, revêtements, membranes et autres dispositifs à base nanotechnologique aideront à trouver de nouvelles réserves de pétrole et de gaz, à accroître la capacité d'extraction sur les puits existants, à réduire les coûts d'extraction et de traitement, et à réaliser des gains de productivité.

La Nano Petroleum, Gas and Petrochemicals Industries Conference de novembre 2009, qui s'est tenue au Caire en Egypte, a esquissé les grandes lignes des attentes en matière d'application des nanotechnologies à l'exploration, au forage, à la production, à l'ingénierie, à la diaggraphie des puits, au raffinage, à la transformation et au transport des carburants fossiles. Sur le site web de la conférence, on admettait ouvertement à quel point le secteur des hydrocarbures compte sur les nanotechnologies pour prolonger son existence (SabryCorp n.d.a.).

Où les nanotechnologies sont-elles employées ?

Les partisans des nanotechs espèrent possible de mettre au point des détecteurs à l'échelle nano ou micrométrique pouvant être injectés dans les puits de pétrole et de gaz. En passant dans les failles et pores de la roche, ces capteurs recueilleraient en temps réel des données sur les caractéristiques physiques, chimiques et spatiales de l'intérieur du puits et des hydrocarbures qu'il recèle.

En association avec deux universités australiennes, le CSIRO travaille sur des nanodétecteurs chimiques pour accroître le rythme de découverte de gisements de pétrole et de gaz sous-marins (CSIRO n.d.b.). Il a mis au point des détecteurs d'hydrocarbures ultrasensibles qui comportent une couche imprimée de nanoparticules d'or reliée à des électrodes. Ces détecteurs arrivent à déceler d'infimes suintements d'hydrocarbures au fond de la mer et peuvent fournir en temps réel des informations moléculaires indiquant le type de fluide en cause. Ils pourraient fonctionner en continu pendant les relevés en mer pour fournir des profils d'hydrocarbures dans l'eau permettant d'en établir une cartographie, comme on le fait pour les données sismiques, électromagnétiques et magnétiques.

Au Royaume-Uni, le Conseil de recherche en sciences physiques et de l'ingénieur finance des recherches faites par BP et l'université du Surrey pour mettre au point des « nanoparticules intelligentes injectables » que l'on introduirait dans les gisements pour mieux identifier et cartographier le pétrole résiduel afin d'en accroître le taux d'extraction (Gill 2009 ; UK EPSRC n.d.).

Des moratoires temporaires sur l'extraction de pétrole en eau profonde ont suivi l'explosion tragique d'une plateforme pétrolière dans le golfe du Mexique, le 22 avril 2010. Les difficultés pour endiguer le flot de pétrole à de telles profondeurs se sont soldées par le pire désastre écologique de l'histoire des Etats-Unis. Des fonds publics mexicains et japonais n'en ont pas moins financé la mise au point de composites de nanotubes de carbone et caoutchouc pour extraire le pétrole à des profondeurs encore supérieures (Endo et al. 2008). Ces composites seraient utilisés pour souder des matériaux et des joints toriques capables de supporter des températures et des pressions extrêmes. Il s'agit de permettre le forage dans des conditions de température et de pression encore plus difficiles, afin que les compagnies puissent extraire du pétrole jusqu'ici inaccessible en raison de la profondeur.

On travaille aussi sur des nanomembranes pour mieux filtrer les impuretés du pétrole et du gaz. Parmi les autres applications des nanotechnologies au secteur pétrolier figurent des nanorevêtements pour réduire la corrosion du matériel de forage ; des nanocomposites pour alléger le matériel de forage et en augmenter la résistance, permettant ainsi des forages plus profonds ; des nanocomposites pour alléger et renforcer les tuyaux et conduites ; des nanolubrifiants pour réduire les frottements dans le matériel de forage ; des revêtements nanotechnologiques pour mieux protéger des événements météorologiques extrêmes (Kingdom of Saudi Arabia 2007 ; SabryCorp n.d.b.).

Les nanotechnologies tiennent-elles leurs promesses ?

Nul ne sait encore dans quelle mesure les nanotechnologies permettront de trouver de nouvelles réserves de pétrole et de gaz, ou d'exploiter des gisements actuellement trop peu rentables.

Commercialisation

On ignore si des produits fondés sur les nanotechnologies sont déjà commercialisés dans le secteur de la pétrochimie. Il semble que les progrès en nanotechnologies en soient encore largement au stade de la recherche-développement. Les recherches dans ce domaine n'en sont pas moins très actives.

L'intérêt de l'industrie pétrochimique pour les nanotechnologies est tel que dix des plus grosses sociétés mondiales ont regroupé leurs forces pour mettre au point des méthodes nanotechnologiques de détection et de cartographie des gisements pétroliers ou gaziers (cf. tableau 4). Ces géants de la pétrochimie se sont associés avec l'université du Texas et l'université Rice pour constituer un Consortium avancé pour l'énergie (AEC ; Advanced Energy Consortium n.d.).

Tableau 4 : Gros pétroliers membres de l'Advanced Energy Consortium, dédié à la mise au point de nanotechnologies pour accroître l'extraction de pétrole et de gaz

BP America	Marathon
Conoco Phillips	Petrobras
Baker Hughes	Schlumberger
Halliburton	Total
Oxy (Occidental Petroleum Corporation)	Shell

La manière dont les nanoparticules manufacturées se déplacent et se transforment dans le sol ou dans des environnements aqueux reste mal comprise, et la nano-écotoxicologie attire peu de financements. L'AEC, en revanche, a attiré « une équipe interdisciplinaire de chercheurs de niveau mondial » au sein d'un consortium à 30 millions de dollars pour suivre et cartographier le mouvement de nanoparticules, nanocapsules et nanorobots dans des gisements d'hydrocarbures (Advanced Energy Consortium 2008 ; Chapman et Thomas 2010). L'AEC a commandité des programmes de recherche dans les meilleures universités du monde. Le géant du pétrole Shell était si désireux de promouvoir la collaboration universitaires-industriels dans la recherche en nanotechnologies qu'il a sponsorisé en 2008 un forum sur la question pour trente des meilleurs experts mondiaux en nanotechnologies et trente salariés de Shell afin d'examiner comment utiliser les nanotechnologies dans la détection, l'extraction et la production de pétrole et de gaz (Parker 2008).

Durabilité et cycle de vie

La conséquence la plus grave à court terme de cette volonté de l'industrie pétrolière de recourir aux nanotechnologies pour accroître l'extraction et la production d'hydrocarbures est claire : l'extraction et la combustion d'une quantité accrue de carburants fossiles se solderait par une hausse des émissions de gaz à effet de serre. Les industriels souhaiteraient améliorer l'efficacité et le rendement de la transformation et de l'usage des carburants, mais nul ne doit s'attendre à ce qu'une amélioration de l'efficacité énergétique aboutisse à des gains pour l'environnement qui seraient à la mesure des réserves supplémentaires de pétrole que, selon les prévisions, l'extraction nanotechnologique pourrait libérer. Si l'AEC dit vrai, ses applications nanotechnologiques doubleront la quantité de pétrole pouvant être tirée des réserves existantes.

Les sociétés pétrochimiques laissent entendre que les nanotechnologies permettront des taux d'extraction bien supérieurs à partir des réserves existantes, allant peut-être jusqu'à doubler la quantité de pétrole auquel on pourra avoir accès, en « réduisant les 50 à 70 % de ressources avérées impossibles à extraire et en accroissant la durée de vie utile des hydrocarbures pour satisfaire les besoins mondiaux en énergie » (Chapman et Thomas 2010).

Un coût écologique supplémentaire du recours aux nanotechnologies dans ce secteur provient des fortes consommations d'énergie nécessaires à la fabrication des nanomatériaux et de la toxicité des nanomatériaux qui seraient délibérément lâchés dans l'environnement. En raison de la quantité colossale de nanomatériaux concernés, cela excéderait de plusieurs ordres de grandeur les dégâts environnementaux liés à d'autres types de nanoproducts. En général, on emploie les nanomatériaux en petites quantités, mais Sergio Kapusta, principal spécialiste des matériaux chez Shell, a expliqué à *E&P Magazine* que, contrairement à d'autres applications des nanotechnologies, l'utilisation de nanomatériaux pour détecter le pétrole, le cartographier et contribuer à son extraction en exigerait des quantités énormes : « pour injecter des nanomatériaux dans un jet d'eau [envoyé dans un gisement], on parle de tonnes, et non de milligrammes, de matériaux » (Parker 2008). La fabrication de tonnes de nanomatériaux aurait un coût énergétique et environnemental monstrueux. Kapusta a en outre reconnu que, si l'expérience était tentée aujourd'hui, la plupart des nanoparticules seraient perdues entre le point d'injection et la destination souhaitée : on n'a guère de contrôle sur leur trajectoire.

Par ailleurs, le déploiement de nanotechnologies pour accroître l'extraction de pétrole et de gaz aurait un coût écologique et social indirect en encourageant l'ouverture de nouvelles zones de forage. Les réserves de pétrole pour l'heure trop compliquées à exploiter pourraient en effet devenir économiquement rentables. Des régions comme l'Arctique et le bassin de l'Amazone abritent des peuples indigènes qui résistent encore à la destruction de leur environnement naturel et de leurs modes de vie par l'industrie pétrolière et gazière. Ces régions ont aussi une grande valeur écologique. Les coûts élevés du forage dans ces régions, ou les quantités relativement faibles d'hydrocarbures aisément accessibles, les ont jusqu'ici en partie préservées des forages. Les nanotechnologies risquent de changer la donne, exposant des contrées vierges et les terres de peuples indigènes à l'exploitation pétrolière et gazière.

Enfin, il existe un coût d'opportunité inhérent à l'investissement dans les moyens nanotechnologiques d'extraction pétrochimique. Plus on investira pour augmenter l'extraction de carburants fossiles, moins il restera d'argent pour les recherches dans les renouvelables, ou pour investir dans des infrastructures permettant de réduire la consommation d'hydrocarbures, telles que des réseaux de transports en commun plus efficaces.

Sécurité sanitaire et environnementale

Certains des nanomatériaux conçus en vue d'une utilisation dans ce secteur pourraient présenter de graves risques pour la santé et l'environnement. Ces risques seraient particulièrement élevés si des tonnes de nanomatériaux se trouvaient volontairement relâchés dans l'environnement pour détecter et cartographier des gisements d'hydrocarbures.

Batteries nanotechnologiques

Résumé

Les batteries lithium-ion (Li-ion) ont été très médiatisées du fait de leur usage dans les voitures électriques et dans la perspective d'un éventuel stockage d'énergie à grande échelle. Le recours à des nanomatériaux a permis la mise au point de batteries Li-ion plus petites et plus efficaces, dotées d'une capacité de stockage supérieure. D'un autre côté, la consommation d'énergie nécessaire à la fabrication des nanomatériaux qu'elles intègrent pourrait accroître l'impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie de ces batteries. La production de nanotubes de carbone monofeuillet, par exemple, est plus énergivore que celle du graphite, classiquement utilisé comme anode dans les batteries Li-ion. La fabrication de ces nanotubes génère en outre un surcroît de dioxyde de carbone, ainsi que de déchets acides et métalliques en solution. L'incorporation de nanomatériaux dans les batteries Li-ion augmente aussi les besoins en énergie pour leur recyclage. On manque d'analyses de cycle de vie pour déterminer si l'utilisation de nanomatériaux dans ces batteries Li-ion se soldera par un gain ou un détriment

écologique. Certains des nanomatériaux que l'on prévoit d'employer dans ces batteries suscitent par ailleurs beaucoup d'inquiétudes en matière de santé et de pollutions.

Contexte

Les piles et batteries ont une longue histoire. Certaines traces indiquent que leur principe pourrait avoir été utilisé il y a déjà quelque 2 000 ans au Moyen-Orient. Nos versions miniatures modernes furent inventées vers 1950 aux Etats-Unis. Ces piles dites « alcalines » ont ouvert la voie aux appareils électroniques portatifs tels que radios, chaînes stéréo, etc. Aujourd'hui, on utilise des nanomatériaux pour améliorer les batteries lithium-ion (Li-ion), une technologie qui offre un meilleur stockage d'énergie que tout autre type de batteries sur le marché.

Comment les nanotechnologies sont-elles censées améliorer les technologies existantes ?

Les nanotechnologies permettent la production commerciale de batteries plus petites, plus légères, plus puissantes et d'une durée de vie accrue. Le gros des efforts de recherche vise la création de batteries plus efficaces et moins chères pour véhicules électriques et hybrides. L'usage de nanomatériaux est également prévu en électronique, ainsi que pour augmenter la capacité de stockage d'énergie issue de sources renouvelables comme le solaire et l'éolien, tout en diminuant le temps de recharge/décharge (Green Car Congress 2009 ; Science Daily 2009). Certains espèrent également que les nanotechnologies renforceront la sécurité des batteries Li-ion, qui sont sensibles à la surchauffe et comportent un risque de feu.

Pour l'instant, on ne sait pas trop si l'utilisation de nanomatériaux dans les batteries Li-ion procurera des gains de performance suffisants pour compenser le surcroît de consommation d'énergie et le détriment écologique de la fabrication de ces nanomatériaux.

Où les nanotechnologies sont-elles utilisées ?

Les nanomatériaux et leurs propriétés physiques quantiques, telles qu'une surface accrue pour un même volume et la capacité d'absorber le lithium, permettent d'augmenter la densité d'énergie dans les batteries Li-ion. Lors d'essais en laboratoire, les nanofils de silicium se sont révélés aptes à stocker davantage de lithium et à garder une charge dix fois supérieure à celle des batteries au lithium normales (Stober 2008).

Dans d'autres expériences avec les batteries Li-ion, on a utilisé des « feuilles » de nanotubes de carbone, résistantes, légères et flexibles, à la place des anodes en graphite. Ce remplacement du graphite par des nanotubes de carbone a triplé la capacité des batteries (Rochester Institute of Technology n.d.). Les chercheurs ont aussi observé que les nanotubes de carbone ont une conductivité thermique et électrique supérieure.

Parmi les autres nanomatériaux employés pour mettre au point la prochaine génération de batteries figurent le nanophosphate de fer lithié, des nano-oxydes de titane, et divers autres nanométaux et matériaux nanocristallins. [...]

p. 32 Supercondensateurs

p. 33 Revêtements et isolants

p. 35 Catalyseurs pour carburants

p. 36 Pièces renforcées pour avions et voitures

39 La plupart des nanoproduits ne sont pas conçus en vue d'économies d'énergie et auront un coût énergétique net

40 Les nanotechnologies futuristes pour l'énergie et le climat

43 Les nanotechnologies tiennent-elles leurs promesses ?

p. 43 Besoins en énergie de la fabrication de nanoproduits

Tableau 5 : Consommation d'énergie et coût environnemental de la fabrication de nanomatériaux

p. 47 *Empreinte écologique*

p. 48 *Risques pour la santé*

p. 50 *Dangers pour l'environnement*

Tableau 6 : Analyse comparative du cycle de vie de nanoproduits et de produits classiques

p. 55 *Bilan énergétique sur l'ensemble du cycle de vie par rapport aux produits classiques*

p. 56 *Les gains d'efficacité aboutiront-ils à des gains pour l'environnement, ou juste à l'augmentation des productions ?*

p. 58 *Parler de nanos « vertes » : de l'écoblanchiment pur et simple ?*

Encadré p. 59 : Les entreprises se dispensent d'études de risques sur les nanomatériaux qu'elles utilisent et ne prennent aucune mesure pour protéger les travailleurs

[...]

Lacunes dans la réglementation

Des gouvernements des cinq continents ont explicitement admis la nécessité de recourir au principe de précaution pour aborder les risques – graves quoique encore mal connus – inhérents aux nanotechnologies. Au Forum international sur la sécurité chimique de 2008 à Dakar, 71 gouvernements, 12 organisations internationales et 39 ONG ont recommandé « l'application du principe de précaution comme un des principes généraux de traitement du risque » nanotechnologique (IFCS 2008).

Swiss Re, une des plus grosses sociétés de réassurance mondiale, a aussi explicitement appelé à l'application du principe de précaution en la matière. Dans son rapport détaillé sur les nanotechnologies, elle avertit : « *Au vu des dangers pour la société que pourrait faire naître l'essor des nanotechnologies, et compte tenu de l'incertitude qui prévaut actuellement dans les milieux scientifiques, le principe de précaution devrait être appliqué, quelles qu'en puissent être les difficultés.* » (Swiss Re 2004, 47).

La Royal Society britannique, la plus ancienne institution scientifique du monde, a recommandé en 2004 que, vu les suspicions de risques graves de nanotoxicité, les nanoparticules soient traitées comme de nouveaux produits chimiques et soumises à une évaluation de sûreté entièrement nouvelle avant toute autorisation d'incorporation dans des produits de consommation. Elle a aussi recommandé que toute présence de nanoingrédients soit indiquée sur les produits pour permettre aux gens de choisir en connaissance de cause. De surcroît, elle a recommandé que les usines et les laboratoires de recherche traitent les nanomatériaux comme des substances dangereuses, et que leur rejet dans l'environnement soit autant que possible évité tant qu'il n'aura pas été démontré que leurs effets bénéfiques l'emportent sur les risques (UK RS/RAE 2004). Le Comité scientifique de l'Union européenne sur les risques sanitaires émergents et nouveaux a aussi reconnu les nombreuses failles des réglementations existantes concernant la prise en compte des risques spécifiques liés à la nanotoxicité (EU SCENIHR 2006).

Malheureusement, dans la plupart des pays, l'immense majorité des nanomatériaux ne sont en pratique encore soumis à aucun contrôle. Aux Etats-Unis, en Europe, en Australie, au Japon et dans bien d'autres pays, les dispositifs réglementaires traitent toutes les particules de la même manière. Autrement dit, ils ne reconnaissent pas que les nanoparticules de substances usuelles peuvent présenter des propriétés et risques tout à fait nouveaux (Bowman et Hodge 2006 ; Bowman et Hodge 2007). Bien que nombre de nanomatériaux maintenant sur le marché posent des problèmes de toxicité plus importants que les mêmes matériaux sous forme de particules de taille supérieure, dès lors qu'une substance a été approuvée sous sa forme habituelle, il demeure légal de la vendre sous une forme nanométrique. Il n'y a aucune exigence, ni de nouveaux tests de sécurité, ni d'étiquetage pour informer les consommateurs, les ouvriers ou les employeurs, ni de nouvelles normes d'exposition professionnelles ou de mesures pour protéger les professionnels et garantir que leur environnement de travail est sain. Chose incroyable, il n'est même pas exigé du fabricant qu'il informe les instances de réglementation dont relèvent ses produits qu'il utilise des nanomatériaux.

C'est en Europe qu'ont été consentis les efforts les plus importants pour combler les lacunes juridiques en matière de nanotechnologies. L'Europe a déjà amendé sa directive sur les cosmétiques pour exiger une notification spécifique aux nanos et une évaluation de la plupart des nanomatériaux utilisés dans les écrans solaires et les produits de beauté (European Commission 2009). Cela devrait prendre effet en 2012 ou 2013. Concernant plus directement l'objet de ce rapport, le Parlement européen, suite à une proposition de sa commission Environnement, s'est lancé dans un inventaire de toutes les réglementations européennes pour examiner leur aptitude à faire face aux nouveaux défis et risques des nanotechnologies (Euractiv.com 2009). La Commission européenne devrait achever fin 2011 cette étude des réglementations sur les nanomatériaux. Elle s'attachera plus particulièrement à intégrer les nanomatériaux dans la réglementation REACH sur les produits chimiques, et les résultats seront inclus dans la révision de REACH prévue pour 2012.

Dans le cadre de sa Directive sur la limitation des substances dangereuses (RoHS), la commission Environnement du Parlement européen a proposé des mesures d'interdiction du nanoargent et des nanotubes de carbone longs multifeuillets (Service de presse du Parlement européen 2010). La commission a également demandé l'étiquetage des équipements électriques et électroniques contenant des nanomatériaux. Les mesures proposées font actuellement l'objet d'intenses débats. L'Institut de Wuppertal, un centre de recherche allemand sur la durabilité, a aussi plaidé pour l'extension de la directive RoHS au photovoltaïque (Saurat et Ritthof 2010). Cela impliquerait l'arrêt de l'utilisation de métaux lourds toxiques comme le cadmium dans la nouvelle génération de panneaux solaires nanotechnologiques.

En Australie, fin 2009, le Plan national pour la notification et l'évaluation des produits chimiques industriels a proposé l'examen de nouvelles mesures qui cherchent à combler les vides juridiques entourant les nanomatériaux utilisés en chimie et en cosmétique industrielles (NICNAS n.d.). Ces propositions en restent toutefois au stade de la consultation. Le gouvernement fédéral a explicitement rejeté les appels à un enregistrement obligatoire des nanomatériaux manufacturés commercialisés (Lauder 2010) ainsi qu'à de nouveaux règlements pour protéger les travailleurs d'une exposition professionnelle (Hall 2009).

Aux Etats-Unis, l'Agence de Protection de l'Environnement (EPA) et la Food and Drug Administration (FDA) ont toutes deux reconnu les failles actuelles de la réglementation et l'absence de prise en compte des nanomatériaux, mais leurs actions se sont jusqu'ici révélées totalement inadéquates. L'EPA a continué à différer la réglementation des nanomatériaux, en dépit d'une action en justice intentée par une coalition d'associations de consommateurs menée par le Centre international d'évaluation technologique (ICTA) et incluant les Amis de la Terre (Kimbrell 2008). L'Agence a ouvert de nombreuses périodes de réflexion sur une réglementation adaptée aux technologies qui recourent au nanoargent, mais celles-ci n'ont pas encore débouché sur des changements réglementaires notables. La FDA a suivi la même politique consistant à beaucoup palabrer sans rien faire. Les fabricants peuvent commercialiser des nanoproduits dans de nombreux domaines sans le moindre essai, évaluation, collecte de données ou approbation préalables de la FDA.

L'université des Nations unies a abouti à la conclusion que les risques potentiels des nanotechnologies constituent un obstacle au déploiement à grande échelle de nanoproduits pour faire face au changement climatique. « Un des principaux obstacles qu'elle souligne est l'absence de dispositif réglementaire solide et transparent en mesure de répondre aux préoccupations exprimées par certains groupes sur les menaces potentielles pour la santé humaine et d'autres risques écologiques associés à certaines formes de ces technologies » (Esteban et al. 2008). Les Amis de la Terre estiment en effet que, sans une réglementation crédible, transparente et basée sur la précaution, l'ensemble du secteur des nanotechnologies sera confronté à un avenir incertain et à haut risque.

Il est de la plus grande importance d'empêcher la mise en décharge de déchets nanotechnologiques dangereux dans des communautés et des pays pauvres. Il faut une réglementation stricte et contraignante pour que les producteurs assument la pleine responsabilité à long terme de leurs nanoproduits. La reprise des produits défectueux ou en fin de vie, le recyclage chaque fois que possible et les frais de mise en sécurité des composants non recyclables doivent être à la charge des entreprises. Un effort international est aussi nécessaire pour éviter l'exportation de déchets nanotechnologiques de pays du Nord vers les pays du Sud. Cela devrait inclure le renforcement de la

Convention de Bâle, traité international qui contrôle les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et leur élimination. Il est inacceptable que les Etats-Unis, qui sont parmi les principaux promoteurs des nanotechnologies et du développement technologique, aient jusqu'ici refusé de signer ce traité. Il est de surcroît crucial d'introduire des dispositions plus strictes pour empêcher que l'on ne se débarrasse d'appareils électroniques sous couvert d'exportations.

Il est par ailleurs urgent qu'une réglementation impose la conception de nanoproducts plus faciles à recycler. Le Programme des Nations unies pour l'Environnement a averti que, si l'on veut éviter des pénuries imminentes des métaux rares utilisés en électronique et dans le domaine de l'énergie, il est essentiel de prendre des mesures pour favoriser le recyclage des produits de haute technologie (UNEP 2010 a).

Enfin, au-delà du problème majeur de la gestion des risques inhérents aux nanomatériaux, le présent rapport montre clairement la nécessité de veiller à ce que des analyses sur la consommation énergétique et les émissions de GES fassent partie du processus de réglementation. La généralisation du nanoargent pour des usages aussi futiles que des chaussettes anti-odeurs crée un grave danger d'accélération des émissions de protoxyde d'azote par des bactéries (voir plus haut). C'est une raison impérieuse de mettre fin aux ventes de tels produits.

Nécessité d'une évaluation transparente des technologies au niveau international

Au-delà des politiques publiques nationales, les instances intergouvernementales doivent se pencher d'urgence sur les lacunes réglementaires en matière de nanotechnologies et commencer à évaluer les impacts environnementaux et socio-économiques des nouvelles technologies, tout en créant les moyens d'encourager une participation effective des populations aux processus de décision.

Les nanotechnologies climatiques pourraient bien finir par avoir accès aux marchés mondiaux et par bénéficier de larges soutiens gouvernementaux par le biais de mécanismes de marché tels que le Mécanisme de développement propre (MDP) de la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique (UNFCCC) et du protocole de Kyoto (UNFCCC n.d.).

Le « transfert de technologies » de pays du Nord vers des pays du Sud est un des quatre sujets clés en cours de discussion dans le cadre des négociations internationales de l'UNFCCC en vue de résoudre la crise climatique. Les autres sujets sont l'atténuation, l'adaptation et le financement (ETC Group 2009). Les décisions concernant les transferts de technologies sont actuellement entre les mains du groupe d'experts de l'UNFCCC sur le transfert de technologies. Ce groupe cherche à coupler du capital-risque à des projets dans des pays en développement, ce qui se fait trop souvent dans une perspective de profits financiers.

Alors que le MDP a été créé afin de contribuer à limiter les gaz à effet de serre pour lutter contre les dangers du changement climatique, ce mécanisme est aussi devenu l'occasion pour des capitalistes de récolter massivement des fonds et des soutiens pour des projets douteux. Sous couvert de transfert de technologies, le MDP laisse la porte grande ouverte à ce que de nouvelles technologies climatiques reçoivent appuis et soutiens financiers. Cela rend crucial d'empêcher l'approbation de technologies néfastes à travers ce mécanisme. Par le biais du MDP, les nanotechnologies pourraient être rapidement adoptées et imposées aux nations en développement, malgré l'absence totale de preuves de leur sûreté et de leur efficacité. D'autres technologies non éprouvées et à haut risque, comme la géo-ingénierie ou le biochar, ont déjà fait l'objet d'un lobbying et de plaidoyers intensifs dans le cadre de l'UNFCCC.

Une des fonctions du MDP est de distribuer des crédits-carbone (équivalents à une tonne de dioxyde de carbone) du type CER (réductions certifiées d'émissions) aux pays développés, qui peuvent les échanger et les vendre. Cela permet à ces pays de satisfaire aux obligations de diminution de Kyoto sans pour autant réduire leurs propres émissions. Les pays développés peuvent soumettre à l'approbation du bureau exécutif du MDP un projet pour travailler bilatéralement avec un pays en développement. Pour étayer une demande, il suffit de déclarer que le projet contribuera à un

développement durable dans le pays en développement. Miné par la spéculation, le marché du carbone constitue en réalité une méthode très discutable pour lutter contre le changement climatique (Lohmann 2006). Nombre de projets approuvés au titre du MDP sont des projets de biomasse, qui encouragent l'accaparement de terres et affaiblissent la biodiversité.

Des organisations de la société civile (dont les Amis de la Terre) ont engagé auprès de l'UNFCCC des actions dans lesquelles elles insistent sur la nécessité de renoncer aux technologies superflues et dangereuses, pour soutenir plutôt celles qui peuvent vraiment être utiles au plus grand nombre (ETC Group 2009). Une déclaration de la société civile a été préparée en vue des négociations climatiques de l'UNFCCC qui se sont déroulées en 2009 à Copenhague. La déclaration stipulait :

« Le principe de précaution exige que les technologies fassent l'objet d'une minutieuse évaluation avant, et non pas après, que les gouvernements et les organes intergouvernementaux commencent à financer leur développement et à favoriser leur déploiement un peu partout dans le monde. Il existe déjà un précédent en droit international : le Protocole de Carthagène sur la prévention des risques biotechnologiques, ratifié par 157 pays, s'est donné ce principe pour assise en ce qui a trait aux organismes génétiquement modifiés. La mise en place de programmes nationaux et internationaux de consultation publique, prévoyant la participation des populations qui sont directement touchées, est essentielle. Les gens doivent avoir la possibilité de décider quelles technologies ils veulent et de rejeter les technologies qui ne sont ni respectueuses de l'environnement, ni équitables sur le plan social.

Nous exigeons par conséquent qu'une approche claire et cohérente soit adoptée à l'échelle internationale pour toutes les nouvelles solutions technologiques proposées au changement climatique : les États qui participeront à la conférence COP 15 doivent faire en sorte que des mécanismes de précaution rigoureux pour l'évaluation des technologies soient institués et rendus juridiquement contraignants, pour que les risques et les impacts probables, ainsi que le bien-fondé de ces nouvelles technologies, soient évalués de façon adéquate et démocratique préalablement à leur déploiement. De plus, tout nouvel organe voué à l'évaluation et au transfert des technologies devra assurer en son sein une représentation équitable des deux sexes et des différentes régions, en plus de favoriser la consultation et la participation pleines et entières des paysans, des peuples autochtones et des communautés locales susceptibles d'être touchées. »

Voir la déclaration entière sur <http://www.etcgroup.org/en/node/4957>

En matière d'adoption de technologies, l'AIE, l'Agence internationale de l'énergie, est une autre instance internationale éminemment influente. Un de ses principaux objectifs est de veiller à « la collaboration en matière de technologies énergétiques » entre pays. Pourtant, ses membres ne comprennent que des pays riches, le Sud n'étant absolument pas représenté (IEA 2010). Il est donc vraisemblable que cette agence œuvre dans l'intérêt des pays riches.

La délégation bolivienne à la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique a clairement dénoncé la promotion de technologies élitistes et à haut risque sous couvert de s'occuper du changement climatique. La Bolivie « refuse les pratiques et technologies néfastes pour l'humanité et l'environnement, comme les produits agrochimiques, le contrôle des semences par des firmes privées et l'usage intensif d'eau, le génie génétique et notamment la technologie limitant l'utilisation des semences, les agrocarburants, les nanotechnologies et la géo-ingénierie » (UNFCCC Délégation de Bolivie 2010).

[...]

p. 65 Équité et accès : les nanotechnologies pourraient renforcer les inégalités

p. 69 Au-delà des nanotechnologies : autres modalités d'action contre la crise énergétique et le changement climatique

[...]

La « révolution » nano en matière de climat et d'énergie : un nanopas en avant, plusieurs pas en arrière ?

En ce qui concerne le changement climatique, l'industrie des nanotechnologies a beaucoup promis et peu tenu. Les besoins énergétiques de la fabrication de nanomatériaux sont bien plus élevés que prévu. Il est apparu que nombre de nanomatériaux utilisés dans ce domaine posent des problèmes de toxicité. Les difficultés du passage au stade commercial ont été sous-estimées. De surcroît, quantité d'applications des nanotechnologies reposent sur des métaux rares dont la disponibilité sera limitée.

Le plus inquiétant peut-être, c'est que les nanotechnologies sont mises au point par les plus grosses compagnies pétrochimiques mondiales afin d'identifier de nouvelles réserves de pétrole et de gaz ou d'en accroître l'extraction. Des fonds publics sont aussi investis à cette fin à travers le monde, notamment en Australie (CSIRO n.d.a.), au Royaume-Uni (UK EPSRC n.d.), aux Etats-Unis (US DOE, n.d. ; Karoub 2004), au Mexique (IEA 2009), au Japon (Endo et al. 2008) et en Arabie Saoudite (Kingdom of Saudi Arabia 2007). Alors que nous devons absolument mettre un terme à notre dépendance vis-à-vis des énergies fossiles, il nous faut veiller à ce que les financements publics ne soient pas détournés vers ce type de recherches.

Les Amis de la Terre concèdent que certaines nanotechnologies pourraient peut-être offrir quelques possibilités utiles d'améliorer les technologies du secteur des énergies renouvelables. Par exemple, certains nanomatériaux utilisés dans des supercondensateurs pourraient considérablement accroître la capacité de stockage de l'énergie d'origine éolienne. Cependant, la présente étude révèle qu'une grande partie des produits conçus pour économiser l'énergie augmenteront en réalité les émissions de GES et les besoins énergétiques, pour peu que l'on considère l'ensemble de leur cycle de vie. Cela est dû au caractère très énergivore de la fabrication et du recyclage des nanoproduits. L'aptitude des déchets nanotechnologiques à interrompre le cycle du carbone et de l'azote est par ailleurs une grave source d'inquiétude.

Les précieux fonds publics devraient être affectés aux domaines qui offrent les plus grandes perspectives de réduction à court terme des émissions de gaz à effet de serre. Ce ne seront pas obligatoirement – ni souvent – des applications nanotechnologiques. On devrait exiger des entreprises et des secteurs industriels qu'ils fassent la preuve que leurs recherches, prototypes ou produits peuvent vraiment contribuer à des réductions de GES, et qu'ils montrent comment ils ont pris en compte la consommation énergétique de la fabrication des nanomatériaux. ***Certains domaines de recherche en nanotechnologies constituent une dangereuse diversion par rapport au réel effort de baisse des émissions que nous avons besoin d'entreprendre, et représentent un coût d'opportunité substantiel au détriment des mesures de réduction d'émissions qui pourraient autrement recevoir des aides publiques.*** L'hydrogène est ainsi un domaine de recherche nanotechnologique grassement subventionné qui n'a, selon nous, aucune capacité véritable à offrir des solutions à la crise climatique.

Il importe de prendre conscience que, sur le marché, les nanoproduits ne procurant aucune économie d'énergie sont bien plus nombreux que ceux qui pourraient en offrir. Non seulement la fabrication des nanoproduits majoritaires dans les ventes et les stocks, comme les cosmétiques et les produits d'hygiène corporelle, est très énergivore, mais leur utilisation ne permet aucune économie d'énergie. Cela est vrai de beaucoup, sinon de la plupart, des produits nanotechnologiques commercialisés. « Comme c'est typiquement le cas des industries en croissance rapide, les fabricants de produits nanotechnologiques sont plus soucieux de maximiser la production et le développement technologique que de veiller à l'efficacité et à la durabilité écologiques » (Seager et Linkov 2009, 426).

Les Amis de la Terre considèrent que, pour nous sauver du changement climatique, il ne suffit pas de s'en remettre au hasard des miracles et trouvailles technologiques : il faut un changement de système. Encourager la dépendance à l'égard de nanotechnologies non éprouvées et d'autres pseudo-solutions *high tech*, c'est compromettre notre capacité à faire face avec succès à la crise climatique. Dans bien des cas, les économies d'énergie les moins coûteuses et les plus efficaces seront plutôt obtenues par une diminution de la consommation et par des politiques aptes à la favoriser.

Recommandations des Amis de la Terre USA et Australie

Ces cinq dernières années, les Amis de la Terre ont appelé à un moratoire sur la commercialisation de nanoproducts tant qu'une réglementation spécifique aux nanotechnologies ne protégerait pas convenablement la population, les salariés et l'environnement des risques qui leur sont inhérents, et tant que le grand public ne serait pas réellement associé aux prises de décisions. La Royal Society et la Royal Academy of Engineering britanniques ont, de même, appelé à l'interdiction du rejet intentionnel de nanomatériaux dans l'environnement tant que l'on n'aura pas prouvé que les bénéfices l'emportent sur les risques (UK RS/RAE 2004). Pourtant, malgré un nombre grandissant de preuves toxicologiques, fort peu de mesures ont été prises pour faire face à ces problèmes urgents.

Une approche des nanotechnologies faisant passer la précaution au premier plan est essentielle pour toutes les catégories de nanoproducts. Sans intervention des pouvoirs publics, c'est toute une nouvelle génération de nanoproducts encore plus énergivores qui inondera le marché. Il faut une réglementation pour évaluer les implications des nanotechnologies en matière non seulement de santé et de sécurité, mais aussi de consommations d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre.

En particulier, il faut des réglementations pour :

- Protéger le public et l'environnement face aux risques de nanotoxicité, dont ceux des produits antimicrobiens
- Evaluer les consommations énergétiques et les émissions de GES liées à la fabrication de nanoproducts
- Rendre les fabricants responsables de la récupération et du recyclage des produits en fin de vie
- Exiger des fabricants des programmes de reprise et de recyclage, et les inciter à maximiser l'aptitude au recyclage lors de la conception des produits
- Exiger un étiquetage pour satisfaire au droit à l'information
- Instaurer une législation exhaustive et fondée sur la précaution pour traiter les risques associés aux nanotechnologies en général
- Interdire l'exportation de déchets nanotechnologiques dangereux et de nanoproducts obsolètes ou périmés, surtout vers les pays du Sud

Tous les nanomatériaux doivent être soumis à des évaluations de sûreté comme s'il s'agissait de substances entièrement nouvelles, même quand les propriétés de leurs homologues à l'échelle micrométrique sont parfaitement connues. Tous les nanomatériaux manufacturés doivent par ailleurs faire l'objet d'évaluations – spécifiques aux nanos – de leurs impacts écologiques et sanitaires, et leur innocuité doit avoir été démontrée avant toute autorisation pour un usage commercial. Ces évaluations des nanomatériaux doivent reposer sur le principe de précaution, et la charge de la preuve de l'absence de nocivité doit incomber au fabricant. Pas de données, pas de marché. Toutes les informations utiles aux évaluations de sûreté, ainsi que les méthodologies employées pour les obtenir, doivent relever du domaine public.

Les Amis de la Terre exigent par ailleurs que l'on accorde une priorité accrue aux recherches sur l'analyse du cycle de vie des nanoproducts et sur les besoins en énergie de leur fabrication. Nous réclamons l'adoption de critères clairs en matière de prises de décision quant aux priorités pour la recherche publique ou financée par des deniers publics. L'analyse scientifique détaillée que requiert une évaluation rigoureuse des nanoproducts étant complexe, longue et coûteuse, elle ne devrait être entreprise que pour les technologies les plus prometteuses, et uniquement en l'absence de technologies de remplacement plus simples.

Suggestions pour les salariés et le grand public

Les professionnels ont besoin d'être protégés des risques d'exposition aux nanomatériaux sur leur lieu

de travail. Cela importe tout particulièrement, puisqu'il est apparu que certaines formes de nanotubes de carbone se comportent comme l'amiante et peuvent provoquer des mésothéliomes. Il serait impardonnable de laisser les nanotechnologies reproduire la tragédie de l'amiante.

La santé au travail est importante partout, mais spécialement dans les pays du Sud, où les travailleurs ont déjà eu à subir, dans le secteur électronique, des conditions de travail dangereuses et une pollution de leur environnement. Une réglementation énergique, fondée sur le principe de précaution, est donc nécessaire pour éviter l'utilisation de nanomatériaux dont l'inocuité n'a pas été démontrée. Les gouvernements doivent aussi mettre en place une législation stricte quant au « droit de savoir », exigeant des industriels qu'ils informent tous les salariés et professionnels concernés des nanomatériaux qu'ils manipulent.

Les salariés devraient discuter avec leurs collègues ou leurs délégués syndicaux des possibilités d'actions collectives visant à garantir la sécurité de leur lieu de travail. La population doit avoir la liberté de choisir des produits non nanotechnologiques par le biais d'un étiquetage clair et obligatoire. Beaucoup de gens choisiront d'éviter les nanoproduits, non seulement en raison des risques de toxicité, mais aussi pour réduire leur empreinte carbone. Les citoyens devraient également explorer les possibilités d'actions collectives visant à s'assurer que leur santé et leur environnement ne seront pas menacés par les nanotechnologies.

Il est crucial d'exiger des pouvoirs publics des comptes sur les priorités qu'ils établissent dans l'affectation des fonds publics. Au lieu de soutenir l'exploration et l'extraction de substances pétrochimiques, les financements publics devraient impérativement aller aux domaines de recherche-développement qui offrent des possibilités immédiates de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Glossaire

Antioxydant

Molécule qui ralentit ou empêche l'oxydation destructrice (l'interaction de substances avec l'oxygène en un processus pouvant conduire à leur destruction). Le stress oxydatif (ou oxydant) peut endommager les cellules.

Biocide

Pesticide utilisé en dehors des applications agricoles, comme agent antimicrobien surtout.

Biodisponibilité

La biodisponibilité mesure la proportion dans laquelle une substance peut passer dans le système sanguin, et sa disponibilité sur son lieu d'action.

Biopersistant

Se dit d'une substance que nos corps ne sont pas capables de décomposer en éléments utilisables ou aptes à être éliminés.

Biopolymères

Tout polymère (longue chaîne répétitive de molécules) que l'on trouve dans la nature. Ex. : l'amidon, les protéines, l'ADN.

Boîtes quantiques

Sphères de dimension nanométrique de matériaux inorganiques. Elles sont dotées de propriétés optiques originales permettant à différentes longueurs d'ondes lumineuses d'émettre de la lumière visible.

Dendrimère

Macromolécule synthétique à trois dimensions, dotées de ramifications, le plus souvent créée par un processus de fabrication à l'échelle nanométrique.

Espèces réactives de l'oxygène (ROS, *reactive oxygen species*)

Très petites molécules fortement réactives du fait de la présence d'électrons non appariés. Ce sont en particulier les ions oxygène, les radicaux libres et les peroxydes. Les ROS sont un sous-produit naturel du métabolisme normal de l'oxygène, et jouent un rôle important dans la transmission des signaux cellulaires. En période de stress environnemental cependant, les niveaux de ROS peuvent grimper de façon spectaculaire et causer des dommages importants aux structures cellulaires (stress oxydant).

Fullerène de carbone (« buckyball »)

Un fullerène est une molécule de carbone pur, composée d'au moins 60 atomes, dont la forme évoque un ballon de football creux ou un dôme géodésique.

Granulome

Petite masse ou nodule de tissu en inflammation chronique, habituellement associé à un processus infectieux ou une lésion tissulaire, tel qu'on en trouve dans la maladie de Crohn, la tuberculose, la sarcoïdose, etc.

In vitro

Se dit d'une expérience réalisée dans un tube à essai ou sur un milieu de culture.

In vivo

Se dit d'une expérience réalisée dans un organisme vivant.

Nanocomposites

Matériaux obtenus par insertion d'un nanomatériau chargé dans un matériau matrice, comme par exemple les polymères de plastique.

Nanodétecteur

Détecteur ponctuel ou réseau de capteurs chimiques, biologiques ou physiques de taille nanométrique, utilisé pour déceler et transmettre des informations sur un environnement donné, comme la température, le pH, la localisation ou la présence de tissus malades.

Nanofils

Fils extrêmement fins, dont le diamètre est de l'ordre de quelques nanomètres (nm) ou moins.

Nanofibres de carbone

Désigne une configuration de fibre en empilement de cônes, d'un diamètre de 70 à 200 nm pour une longueur de 50 à 100 µm.

Nanotube

Nanomatériau de forme cylindrique, souvent constitué de carbone, mais aussi de dioxyde de titane, de bore ou d'autres éléments. Les nanotubes de carbone à simple feuillet (SWCNT, *single walled carbon nanotubes*) sont constitués d'un seul cylindre d'atomes de carbone, alors que les nanotubes de carbone multifeuillets (MWCNT, *multi walled carbon nanotubes*) comportent de nombreux cylindres concentriques d'atomes de carbone. Extrêmement solides et légers, les nanotubes sont aussi d'excellents conducteurs d'électricité.

Polymère

Substance formée de la répétition de nombreuses unités chimiques ou molécules. On utilise souvent le terme polymère à propos du plastique, du caoutchouc ou des élastomères.

Stress oxydant (ou oxydatif)

Déséquilibre entre la production d'oxygène réactif et l'aptitude d'un système biologique à éliminer aisément les intermédiaires réactifs ou réparer facilement les dégâts correspondants.