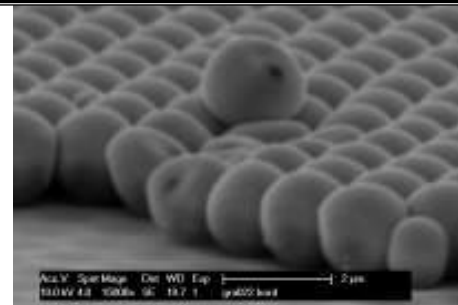
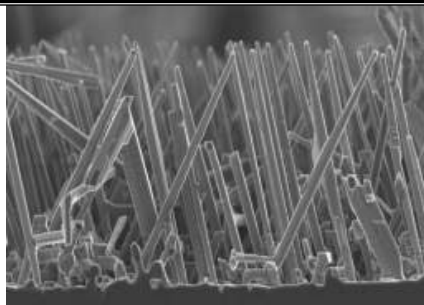
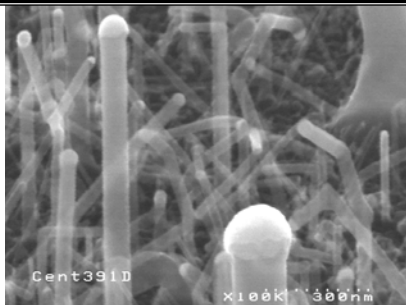


DOSSIER DE PRESSE



« Nanosafe »

Recherches dans les domaines de la production et de l'utilisation sécurisées des nanomatériaux ;
Applications aux nouvelles technologies de l'énergie.

Voyage de presse CEA Grenoble - Mercredi 5 novembre 2008

CONTACT PRESSE : CEA / Service Information-Media

Stéphane LAVEISSIERE Tél. : 01 64 50 27 53 - stephane.laveissiere@cea.fr

CEA Saclay / Siège
Direction de la Communication
Service Information-Média
91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél. : (33) 01 64 50 20 11
Fax : (33) 01 64 50 28 92
www.cea.fr/presse

Sommaire :

« Nanosafe » : recherches dans les domaines de la production et de l'utilisation sécurisées des nanomatériaux ; applications aux nouvelles technologies de l'énergie



| | |
|-----------|--|
| 3 | Introduction |
| 6 | L'utilité des nanomatériaux : l'exemple des nouvelles technologies de l'énergie |
| 8 | Nanosafe 2 : les résultats de recherche |
| 8 | Est-il possible de détecter efficacement les nanoparticules en milieu industriel ? |
| 11 | Les équipements de protection conventionnels sont-ils efficaces contre les nanoparticules ? |
| 12 | Que sait-on de l'inflammabilité et de l'explosivité des nanopoudres |
| 14 | La formation et la diffusion des connaissances dans le programme Nanosafe 2 |
| 15 | Les actions du CEA face aux risques potentiels des nanoparticules |
| 18 | Annexes |
| 19 | Le CEA, acteur de la recherche en nanosciences et nanotechnologies |
| 23 | Le CEA-Liten, Laboratoire d'innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les nanomatériaux |

Photos en couverture :

A gauche : nanotubes de carbone ;

Au milieu : nanofils de silicium ;

A droite : nanobilles, utilisées pour des revêtements de surface (voir p.6).

© CEA

Introduction

Les nanomatériaux portent aujourd'hui de grands espoirs à la fois en termes d'applications – santé, nouvelles technologies de l'énergie, technologies de l'information et de la communication – et en termes économiques avec, pour les industriels, des prévisions de chiffre d'affaire global à 10 ans comparables à celles des domaines de la microélectronique ou de l'automobile.

Les nanomatériaux tirent parti des phénomènes particuliers observés dans des structures dont la taille est de quelques nano-mètres (un nano-mètre est égal à 10^{-9} mètre, ou un milliardième de mètre) et leurs propriétés physiques, chimiques, voire biologiques découlent spécifiquement de cette taille nanométrique : par exemples activité catalytique exaltée, modulation du gap optique ou encore renforcement mécanique.

Cette nouvelle industrie naissante, qui concerne à la fois des secteurs traditionnels et des secteurs de haute technologie, ne pourra se développer rapidement que si les risques éventuels pour la santé et l'environnement sont maîtrisés : de la fabrication à l'usage des produits concernés et jusqu'à leur fin de vie.

Le risque spécifique lié aux nanoparticules tient à leurs propriétés associant leur très petite taille (capacité à franchir les barrières biologiques), leur très faible masse (persistance, phénomène d'« aérosolisation ») mais aussi leur surface proportionnellement considérable (réactivité et éventuellement toxicité accrues).

Maîtriser les risques au travail : une priorité des autorités publiques

De nombreux produits industriels contenant des nanoparticules ont déjà été développés dans les années récentes : cependant, ce nouveau secteur économique est certainement l'un des premiers historiquement à faire l'objet, dès son développement, de questionnements et d'études poussées de la part des autorités publiques et des acteurs de recherche concernés quant à son impact sanitaire et environnemental.

Ces études concernent en premier lieu la protection des personnels amenés à fabriquer, utiliser ou caractériser des nano-objets, que ce soit dans des activités de recherche ou de production industrielle.

En France, l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) conduit depuis 2005 des expertises sur les risques liés au développement des nanomatériaux, à la demande de ses ministères de tutelle. Un 1^{er} rapport a été remis en 2005 sur les effets des nanomatériaux sur la santé de l'homme et sur l'environnement. Un 2^{ème} rapport a été remis en 2008 sur les nanomatériaux et la sécurité au travail. Un 3^{ème} concernant l'exposition de la population devrait être publié en 2009. Le CEA participe au « Comité d'experts spécialisés » de ces commissions.

Plusieurs autres acteurs participent à l'étude des risques potentiels induits par les nanomatériaux :

- Le CNRS (Centre national de la recherche scientifique)
- L'INERIS (Institut national de l'environnement et des risques)

- industriels)
- L'INRS (Institut national de recherche et de sécurité)
- Etc.

Plusieurs de ces acteurs ont émis le souhait de voir intégrée la problématique spécifique des nanomatériaux dans le règlement européen Reach (*Registration, Evaluation and Authorisation for chemicals*) sur le contrôle des substances chimiques.

Le rapport sur les nanotechnologies rendu en juillet 2008 par le Conseil économique et social (CES, rapport de M. A.Obidia) va également dans ce sens.

Principe de précaution et nanomatériaux : le CEA applique une politique de maîtrise du risque

Le CEA applique le principe de précaution en matière de risques professionnels liés aux nanoparticules : une nécessité affirmée en octobre 2008 par l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) dans un rapport intitulé « Nanomatériaux : concilier l'innovation et la sécurité sanitaire » :

« Devant l'incertitude actuelle des résultats scientifiques, l'Afsset recommande l'application du principe de précaution ».

Le CEA, à des fins de recherche, mène des activités de fabrication, de manipulation, et de caractérisation de nano-objets (que l'on appelle aussi communément nanoparticules élaborées, 'engineered nanoparticles'). A ce titre, il assure la protection des personnels amenés à rentrer en contact avec des nano-objets (nanoparticules, nanopoudres) et de l'environnement.

La « maîtrise des risques » est une exigence constante au CEA, présente dans tous les programmes de recherche et autres activités d'exploitation d'installations, nucléaires ou non. Elle s'explique de deux façons :

- historiquement, la recherche appliquée dans le domaine nucléaire est indissociable des questions de sûreté et de sécurité des installations ;
- plus fondamentalement, l'activité de recherche amène à dépasser en permanence les connaissances scientifiques et impose donc, de fait, de tenir compte de l'éventuel risque lié, en matière sanitaire ou environnementale.

'Nanosafe': projet européen de recherches sur la production sécurisée des nanomatériaux

Le CEA travaille depuis plusieurs années sur la sécurisation des procédés de production des nanomatériaux. Il conduit une partie de ses recherches dans un cadre européen et coordonne le programme européen Nanosafe.



Après Nanosafe 1, programme qui a permis d'établir un état des lieux des risques associés, Nanosafe 2, lancé en 2005 à l'initiative du CEA, implique 24 organismes de recherche et industriels. Ce projet est financé par la Commission Européenne dans le cadre du 6^{ème} PCRD.

Nanosafe 2

Nanosafe 2 est doté d'un budget de 12 millions d'euros sur 4 ans.

Le CEA est chargé de la coordination de ce projet qui vise à évaluer et gérer les risques concernant les nanoparticules. Il s'agit de :

- développer des technologies de détection, de mesure et de caractérisation des nanoparticules afin de mieux connaître les ambiances de travail ;
- qualifier des équipements de protection et de mesure d'exposition des travailleurs ;
- mettre en place de nouveaux protocoles de test et des études in vivo de manière à approfondir les connaissances toxicologiques dans le domaine ;
- assurer leur traçabilité avec la mise au point de nanotraceurs (fluorescents par exemple) ;
- sécuriser les procédés industriels de façon à obtenir le produit final sans mise en suspension dans l'environnement de nanoparticules au cours du processus de fabrication ;
- faire des propositions aux instances de normalisation internationales, et organiser des formations pour le personnel travaillant sur les nanomatériaux.



Laboratoire de caractérisation des équipements, au CEA Liten (Grenoble).
© P.Avavian / CEA

La conférence 'Nanosafe 2008'

La conférence internationale Nanosafe 2008 se tient du 3 au 7 novembre 2008 sur le pôle Minatec®.

Elle est organisée par le CEA dans le cadre du projet intégré Nanosafe 2.

Cette conférence est tout d'abord l'occasion de faire le point des progrès et des avancées majeurs dans le domaine de la production et de l'utilisation sécurisées des nanomatériaux dans le monde et également de présenter les principaux résultats issus du projet Nanosafe 2.

Thèmes abordés :

- caractérisation, détection et surveillance ;
- toxicologie ;
- analyse du cycle de vie ;
- production industrielle sécurisée ;
- analyse des risques ;
- standardisation, réglementation.

L'utilité des nanomatériaux : l'exemple des nouvelles technologies de l'énergie

Les activités de l'Institut Liten (Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les nanomatériaux) centrées sur l'énergie solaire, l'hydrogène et les piles à combustible et enfin le stockage de l'énergie font appel à une utilisation accrue des nanomatériaux à l'origine de nombreuses ruptures technologiques. Les marchés visés concernent essentiellement les transports électriques, les bâtiments à faible consommation d'énergie et enfin l'alimentation en énergie de l'électronique nomade. L'intérêt des nanomatériaux couvre l'ensemble des processus physiques qui permettent une utilisation rationnelle de l'énergie :

- récupération de l'énergie dans l'environnement : énergie solaire, conversion thermoélectrique ;
- stockage de l'énergie : thermique, électrochimique (batteries) ;
- conversion de l'énergie : piles à combustible, efficacité des moteurs.

Pour chacun de ces processus physiques, les nanomatériaux permettent d'atteindre des niveaux de performances inenvisageables avec les matériaux classiques.

Pourquoi des nanomatériaux ?

Un nanomatériau est constitué de nano objets (dont une des dimensions est < 100 nm) qui présentent des propriétés spécifiques de l'échelle nanométrique. Ces propriétés sont de diverses natures mais la plupart du temps, il s'agit d'accroître le rapport surface/volume, de modifier les propriétés fondamentales de la matière (modification du gap optique, de la conductivité électronique, des caractéristiques thermiques,...). Certaines familles de nanomatériaux sont plus intéressantes que d'autres pour les applications liées à l'énergie. Ainsi, l'Institut Liten s'intéresse aux sujets suivants :

- **Les nanoparticules** à l'état dispersé avec un rapport surface/volume élevé en tant que catalyseurs (piles à combustible, pots catalytiques, chimie) ou introduits dans des fluides pour améliorer leur propriété de transfert thermique (nano fluide).

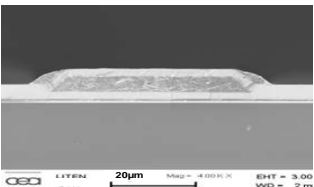

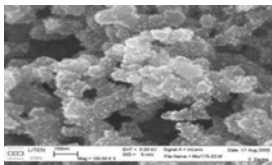
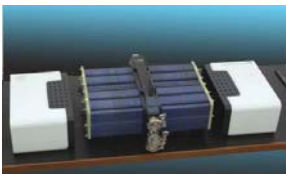
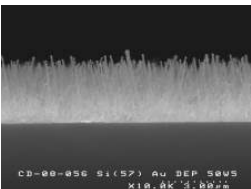

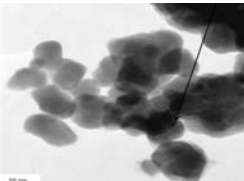

- **Les nanofils ou nanotubes** qui possèdent des propriétés physiques spectaculaires (électrique, thermique, optique) pour obtenir des cellules photovoltaïques à hauts rendements. Les nanofils de matériaux semi-conducteur (Si, SiGe...) sont envisagés dans des systèmes thermoélectriques à performances élevées, l'idée étant de transformer toutes les sources de chaleur en source électrique. Les nanofils sont également envisagés pour le stockage de l'énergie et la conception de batteries à très hautes performances.

- **Les nanocouches** : les revêtements de surface peuvent être constitués d'une couche micrométrique élémentaire ou de multi-nanocouches. Les propriétés recherchées sont une grande dureté, des propriétés de type barrière ou, grâce à des phénomènes de confinement quantique, des propriétés spécifiques de transport. Le remplacement d'une microcouche pour un empilement de nano couches entraîne un bouleversement de certaines propriétés mécaniques. Il est même envisagé de réaliser des nanofils constitués de nano couches pour

combiner plusieurs effets.

- Les nanostructurations en volume de matériaux métalliques ou céramiques confèrent des propriétés particulières grâce à la présence de très nombreuses interfaces (résistance mécanique, superplasticité...).

Quelques exemples d'application des nanomatériaux :

| | | |
|---|---|---|
|  | <p>Thermoélectricité : super réseaux pour séparer les effets conductivité électrique et conductivité thermique - Application : vitre climatique</p> |  |
|  | <p>Piles à combustible : catalyseurs à performance identique avec une moindre quantité de platine - Application : réduction d'un facteur 10 de la quantité de platine nécessaire</p> |  |
|  | <p>Solaire photovoltaïque : nanofils de silicium pour augmenter le rendement de conversion - Application : réalisation de cellules solaire avec des rendements supérieurs à 30 %</p> |  |
|  | <p>Stockage de l'énergie : augmenter la réactivité électrochimique - Applications à des batteries de forte densité d'énergie > 300 Wh/kg</p> |  |

Nanosafe 2 : les résultats de recherche

Le projet Nanosafe 2 publie régulièrement les résultats de recherche obtenus par les différentes équipes européennes participant au projet. Des synthèses, rédigées en anglais (*Dissemination reports*, disponibles sur Internet,) sous forme de questions / réponses permettent à l'observateur même non spécialiste de connaître les résultats des derniers développements dans le domaine.

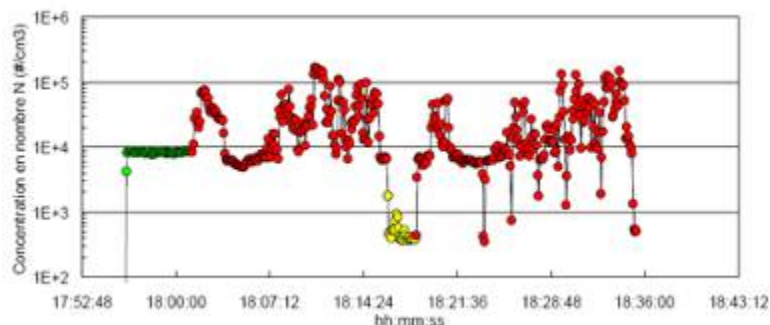
Les observations présentées ci-après en sont issues.

1- Est-il possible de détecter efficacement les nanoparticules en milieu industriel ?

Différenciation du « bruit de fond » et particules d'origine naturelle

Les nanoparticules dispersées dans l'air (ou nanaoérosols) peuvent avoir différentes origines naturelles ou anthropiques : chaque cm^3 d'air même réputé « pur » de nos montagnes contient environ 10 000 nanoparticules d'origine naturelle. Ce nombre très élevé de particules naturelles peut être encore augmenté par les activités humaines : production involontaire de nanoparticules au cours de phénomènes de combustion (nanoparticules dites « incidentelles » ou PUF), et nanoparticules produites intentionnellement en laboratoires ou dans certaines industries.

En plus de la concentration très élevée de nanoparticules naturelles, le « bruit de fond » fluctue souvent avec une forte variabilité : une variation d'un facteur 10 en quelques minutes est possible.



On comprend donc que la sensibilité de la détection de nanoparticules industrielles est handicapée par la concentration élevée, et fluctuante, des nanoparticules existant naturellement. Ainsi, la limite de détection des particules non naturelles dans un environnement conventionnel peut varier dans des marges de $10^5/10^6$ particules / ml.

Il est donc plus facile de détecter des nanoparticules industrielles en environnement contrôlé : salles blanches, hottes filtrantes mobiles...

Quels sont les principes de mesure de la présence de nanoparticules artificielles dans l'air ?

- Masse totale : celle-ci est mesurée par microbalance ;
- Charges électriques portées par les particules, proportionnelles à

leurs surfaces : mesurées avec un électromètre ;

- Mesure de la diffusion lumineuse, qui donne le nombre de particules : utilisation de compteurs optiques ou de compteurs à condensation (les particules sont alors grossies en atmosphère saturante).

Les résultats montrent que :

→ il est nécessaire de standardiser les méthodes de mesures choisies en fonction des types de nanoparticules ;

→ Il est encore difficile de comparer et recouper des résultats de mesures avec des équipements basés sur des principes de mesure aussi différents.

Des équipements de mesure opérationnels sont-ils aujourd'hui disponibles ?

Plusieurs types d'équipements sont disponibles sur le marché pour mesurer des concentrations en nanoparticules, la plupart étant destinés à un usage en laboratoire ; les plus récents sont néanmoins plus « transportables » et plus faciles d'utilisation.

A l'heure actuelle il reste difficile de recommander tel ou tel équipement plutôt que tel autre, chacun ayant ses avantages et faiblesses.

| <i>Compteur à noyaux de condensation portable</i> | | <i>Compteur à mobilité électrique</i> | | <i>Compteur à impaction</i> | |
|---|--|---|---|---|---|
|  | 15 – 500 nm Maxi 5^{E5} part/mL Prix : 7 k€ |  | 10 – 500 nm Maxi : 1^{E7} part/mL Attention : source radioactive Prix : 50 k€ |  | 6-10.000nm Maxi 10^8 part/mL Prix: 75 k€ |

→ une série d'équipements est aujourd'hui disponible et d'une mise en œuvre déjà aisée ;

→ leur utilisation est facile mais l'interprétation de leurs données doit être rigoureuse pour quantifier les nanoparticules : il est en effet souvent nécessaire de prendre en compte le « bruit de fond », la spécificité des réponses obtenues suivant le type de nanoparticules produites, leur cinétique d'agglomération, etc.

Est-il possible de mesurer l'exposition aux nanoparticules ?

L'évaluation de l'exposition des travailleurs sera difficile tant qu'un référentiel de mesure n'aura pas été établi et tant que les mécanismes de pénétration des nanoparticules dans le corps humain ne sera pas connu. On ne peut prétendre aujourd'hui que caractériser l'air d'exposition et l'exposition elle-même.

→ Actuellement, on se situe dans une démarche de progrès continu pour caractériser l'exposition aux nanoparticules en utilisant les meilleures techniques disponibles. Même si celles-ci ne sont pas optimales, les résultats sont de première importance pour protéger la santé des travailleurs.

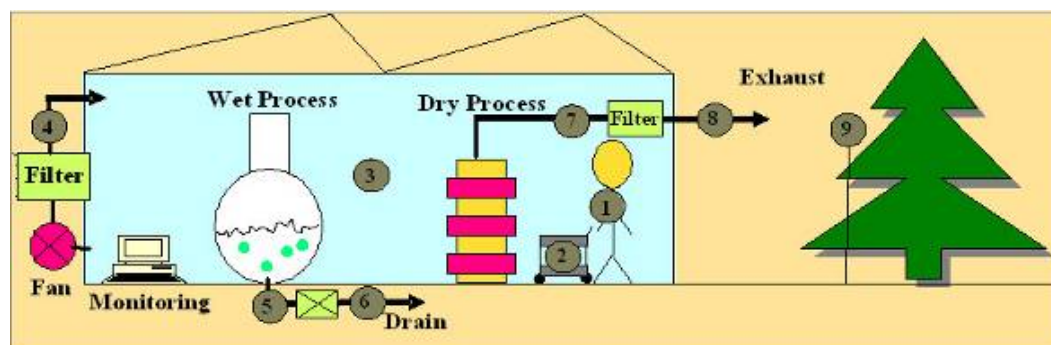
→ Les caractérisations des nanoparticules industrielles doivent être conservées pour connaître les facteurs de risque vus par les travailleurs : forme, taille, constitution, structure cristalline, charge électrique, etc.

Une surveillance automatique est-elle envisageable (monitoring)?

Les chercheurs étudient la possibilité de systèmes de surveillance continue des laboratoires ou lieux de production des nanoparticules, afin de les détecter au plus tôt et de prendre le cas échéant les mesures sanitaires appropriées. Un tel système doit être en mesure de s'adapter aux changements d'atmosphères ambiantes tout en étant fiable, robuste et facilement transposable.

→ Malheureusement aucun équipement répondant à ces critères n'est disponible actuellement sur le marché.

On peut néanmoins définir les types d'équipements nécessaires à l'échelle d'un laboratoire :



- 1- Surveillance individuelle : capteur individuel d'exposition aux nanoparticules – avec analyse journalière ou mensuelle.
- 2- Appareil de détection mobile : pour les nouvelles opérations ou la maintenance, par exemple – temps de réponse : 5 mn.
- 3- Surveillance de la pièce de travail : capteurs collectant les données reliés à une alarme – temps de réaction de 5 à 30 mn.
- 4- Efficacité des équipements collectifs – qualification des équipements de filtration de l'air.
- 5-6- Effluents : protection de l'environnement pour les effluents liquides – mesures ponctuelles ou continues.
- 7-8- Rejets dans l'air : protection de l'environnement par mesures ponctuelles ou continue.
- 9- A l'extérieur : surveillance mensuelle de l'impact de l'activité du site sur l'environnement – mesure en temps réel des variations du « bruit de fond » extérieur afin d'y adapter les dispositifs de surveillance interne.

Peut-on détecter les nanoparticules à distance ?

La détection et l'analyse en plusieurs points via un même outil serait une solution économiquement souhaitable, mais comment les nanoparticules se déposent-elles le long d'un conduit de prélèvement ?

L'expérience montre que le dépôt par diffusion dans un conduit est relativement lent pour des particules supérieures à 10 nm ; si les conduits sont conducteurs électriquement, même une longueur de 20 m reste efficace tant que le débit est inférieur à 10L/mn (quel que soit le diamètre du conduit).

2- Les équipements de protection conventionnels – filtres, cartouches filtrantes, tenues de protection, gants – sont-ils efficaces contre les nanoparticules ? (Étude réalisée au CEA)

L'étude menée par le CEA-Liten dans le cadre du programme européen Nanosafe2 vise à tester l'efficacité de différents types de protection, déjà qualifiés à l'échelle du micron, avec des particules de graphite dont la taille est ajustée de 10 à 150 nanomètres.

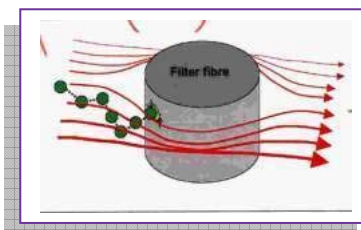
Les essais ont été réalisés dans une installation pilote sécurisée, reflétant ainsi des conditions de manipulation de nanoparticules en milieu professionnel. Les efficacités de différentes barrières ont été vérifiées : filtres du commerce utilisés pour la confection des masques et cartouches filtrantes ainsi que pour le conditionnement de l'air, tenues de protection et gants.

La théorie classique de la filtration est-elle toujours valable à l'échelle nanométrique ?

Les résultats confirment la théorie de la filtration qui prédit une efficacité encore accrue des filtres fibreux vis-à-vis des nanoparticules ; les tests permettent également de préconiser des tenues et des gants plus efficaces que d'autres.

Des essais ont été réalisés sur des filtres 'haute efficacité' dans un banc de test où les particules sont entraînées à travers le filtre par un flux d'air. L'efficacité du filtre est calculée en réalisant des mesures de concentration particulaire en aval et en amont du filtre. La vision "écumoire" du filtre papier, c'est à dire une membrane arrêtant uniquement les particules plus grosses que les trous, est inexacte.

→ Les particules sont arrêtées dans l'épaisseur du filtre selon 3 mécanismes distincts : dépôt par inertie, par interception et par « diffusion Brownienne », c'est-à-dire selon leurs déplacements aléatoires qui augmentent la probabilité de collision avec une des fibres du filtre. C'est ce dernier effet qui augmente avec la diminution de la taille des particules, augmentant ainsi l'efficacité des filtres pour les nanoparticules. Ce comportement a été vérifié pour des particules de graphite jusqu'à 10 nm.



→ Les filtres fibreux tels que les filtres de traitement de l'air, certaines cartouches de filtration de masques et les demi-masques, présentent des efficacités de filtration encore meilleures pour les nanoparticules. Comme pour les particules microniques, l'efficacité des masques est en grande partie dépendante de l'étanchéité masque/visage.

Le CEA a prévu de poursuivre les tests jusqu'à des particules de 1 nm. Les chercheurs veulent vérifier si un phénomène dit de 'rebond thermique' perturberait l'effet brownien mis en valeur : une attente logique puisque si les toutes petites molécules d'air passent à travers les filtres, cela signifie qu'il existe un seuil en-deçà duquel la théorie n'est plus valable.

Quelles sont les préconisations en matière de protection vestimentaire ?

La deuxième série de tests a porté sur des gants et des blouses. Les chercheurs ont mis au point une cellule de diffusion pour vérifier l'efficacité des « médias », ou matériaux, retenus. On applique une concentration particulaire constante en amont de l'échantillon, puis on mesure dans la cavité aval. Cette méthode, dite de 'through diffusion', réalisée avec une légère surpression, reflète un toucher léger effectué avec le gant.



→ Les résultats montrent que les vêtements de travail réalisés en matériaux tissés se comportent comme des filtres fibreux. Vis à vis des nanoparticules, les combinaisons en matériau non tissé (type 'Tyvec') présentent les meilleures performances de protection, et le coton doit donc être proscrit.

→ Les nanoparticules traversent tous les gants testés pour les nanoparticules de graphite centrées à 80 nm et également mais dans une moindre mesure les particules centrées à 30 nm. Le matériau de confection des gants est important, mais également les procédés de mise en œuvre et l'épaisseur.

3- Que sait-on de l'inflammabilité et de l'explosivité des nanopoudres ?

Développement d'instruments de mesure spécifiques :

→ Un nouveau « tube de Hartmann » pour mesurer l'énergie minimale d'inflammation (EMI) :

Les tubes de Hartmann 'classiques' utilisés pour visualiser l'inflammation de poudres et pour mesurer l'énergie minimale d'inflammation (EMI) sont réalisés dans un matériau transparent (verre ou plexiglas) et sont à ouverture. Ce type d'équipement n'est pas très adapté aux nanopoudres à cause de l'émission potentielle de nanoparticules au cours des expériences.

Un tube fermé en acier inoxydable a été conçu, capable de supporter une pression d'explosion de 12 bars, et équipé d'un capteur de pression. Afin de prévenir toute contamination avec l'extérieur de la chambre d'explosion, on a développé un enregistreur de données et des procédures spécifiques de confinement (par combustion de propane et air pulsé).

→ Un nouveau dispositif de percussion pour évaluer les effets d'un impact :

Un impact mécanique sur des nanopoudres pourrait causer une explosion. Les chambres classiques de test permettent à l'opérateur d'observer et d'entendre l'explosion. Ces techniques ne sont pas non plus adaptées aux nanoparticules. Aussi, une nouvelle cellule pressurisée et confinée, et équipée de quatre capteurs thermocouples a été construite et reliée à un logiciel d'analyse spécifique.

Grâce à ces équipements, les expériences sont plus adaptées au comportement des nanoparticules et plus sûres.

Inflammabilité des nanopoudres et force des explosions :

L'inflammabilité (EMI) et la force explosive (pression maximale de l'explosion et taux maximum d'élévation de la pression) de différentes poudres de noir de carbone, de nanoparticules d'aluminium de différentes tailles et de nanotubes de carbone ont été comparées en utilisant un récipient sphérique conforme aux méthodes de normalisation internationales (américaines et allemandes).

Principaux résultats :

- les nanotubes de carbone ont une inflammabilité et une « sensibilité » explosive du même ordre que les autres noirs de carbone nanostructurés ;
- les noirs de carbone nanostructurés ont une inflammabilité et une sensibilité explosive du même ordre que celles enregistrées pour des charbons ou des farines alimentaires ;
- pour les nanopoudres d'aluminium métallique, la légère couche oxydée qui les enveloppe naturellement les rend moins réactives que des micropoudres ;
- les nanopoudres qui tendent à s'agglomérer montrent des résultats du même ordre que ceux enregistrés pour des micropoudres de même substance.

La formation et la diffusion des connaissances dans le programme Nanosafe 2

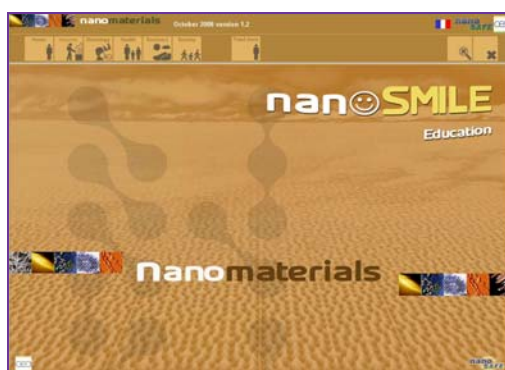
Le logiciel NanoSmile

Le logiciel NanoSmile a été conçu et développé en parallèle du projet européen NanoSafe2.

Son utilisation doit contribuer à permettre aux différents publics de mieux appréhender les risques et les mesures de sécurité associées dans le domaine des nanomatériaux.

Objectifs pédagogiques du logiciel :

- identifier les dangers potentiels et les "bonnes pratiques" ;
- comprendre les difficultés de métrologie et les mesures de protection collective et individuelle préconisées ;
- prendre conscience de l'impact potentiel des nanomatériaux sur la santé et du suivi médical mis en place ;
- estimer l'impact potentiel des nanomatériaux sur l'environnement ;
- appréhender le contexte sociétal de prise de décision et les initiatives de dialogue vers le public.



<http://www.nanosmile.org>

La formation

C'est à partir de ce logiciel, ou 'didacticiel', que le CEA-INSTN (Institut national des sciences et techniques nucléaires) propose des journées de formation au CEA Grenoble. Il s'agit de sensibiliser les professionnels concernés – exploitants, ingénieurs sécurité, responsables de laboratoires – à la maîtrise des risques liés aux nanomatériaux.

Déjà proposée en interne au CEA Grenoble, la formation sera proposée ensuite aux personnels du CEA Saclay, puis aux professionnels 'extérieurs'. Cette formation fait l'objet d'échanges dans le cadre du programme Nanosafe 2.

Les actions du CEA face aux risques potentiels des nanoparticules

Le CEA, établissement qui fabrique des nano-objets¹, est amené, au nom du principe de précaution, à protéger son personnel

Le CEA, à des fins de recherche, mène des activités de fabrication, de manipulation, et de caractérisation de nano-objets. A ce titre, il doit assurer la protection des personnels amenés à rentrer en contact avec des nano-objets (nanoparticules, nanopoudres) et de leur environnement. Le CEA applique le principe de précaution en matière de risques professionnels liés aux nanoparticules : en l'absence de réglementation et étant donné les connaissances lacunaires dont on dispose, le CEA fait en sorte de limiter au maximum d'une part le nombre de salariés susceptibles d'être exposés et d'autre part l'exposition des travailleurs aux nanoparticules. Dans le cadre d'un plan d'action spécifique, associant les équipes de sécurité et les équipes médicales du CEA, toutes les installations pouvant mettre en œuvre des nano-objets ont été répertoriées. Pour ces installations, un ensemble de règles de bonnes pratiques de prévention ont été identifiées et mises en place. Elles ont pour objectif la protection des salariés et la protection de l'environnement. En ce qui concerne les salariés plus particulièrement, ils sont tous habilités nominativement à travailler sur ces installations.

Tous les laboratoires qui travaillent sur les nanosciences et nanotechnologies ne sont pas concernés de la même façon. Les risques potentiels sont de nature différente selon qu'il s'agit :

- de recherche en nanoélectronique :

La nanoélectronique est déjà une réalité industrielle ; ses matériaux et procédés de fabrication sont directement dérivés de ceux de la microélectronique. Or l'industrie de la microélectronique a, dès les années 90, été pionnière dans la maîtrise du risque de « contamination particulaire² » et des procédés de fabrication dits « verts ». Le passage progressif de la microélectronique à la nanoélectronique ne génère donc pas de risques spécifiques en termes de santé. Il génère plutôt un débat de société sur les risques, en terme de liberté individuelle, que ferait courir l'usage abusif de « nano-tags », ces étiquettes électroniques si miniaturisées que leur porteur ignorerait totalement leur présence.



Photo : salle blanche de classe 1 000 'PTA' (plateforme technologique amont) – CEA Grenoble.
© L.Godart/CEA

¹ Objets dont au moins une dimension est < à 100nm.

² Une simple particule de poussière peut endommager toute une ligne de production de semi-conducteurs. Pour éviter cette « contamination » des salles blanches, les professionnels de la microélectronique ont développé des moyens de R&D et de production parfaitement maîtrisés : automates, filtres à air, production de fluides purs, dépressurisation des locaux, etc.

- de recherche en nanobiotechnologies :

Dans les activités du CEA, à la frontière entre les biotechnologies et les nanotechnologies, le risque s'apparente au risque existant dans un laboratoire d'analyse médical. En effet, un laboratoire sur une puce électronique effectuée, dans un volume réduit et avec un très haut niveau d'automatisation, les mêmes protocoles biologiques que ceux qui sont réalisés dans des tubes à essai par les opérateurs ou les automates des laboratoires d'analyse conventionnels. Le risque consiste donc typiquement dans le contact avec de l'ADN artificiel ou naturel, avec des peptides et des protéines. Aucune étude mettant spécifiquement en œuvre des virus ou des bactéries dangereuses n'est menée au CEA. Les précautions d'usage dans les laboratoires d'analyse médicale pour les tests *in vitro* sont appliquées.

- de recherche sur la fabrication de nanoparticules :

En l'absence de données confirmant ou non la toxicité des nanoparticules, le personnel doit impérativement être protégé du risque d'ingestion ou l'inhalation de nanoparticules. C'est sur les installations liées à cette activité que les précautions très spécifiques sont prises (limitation des quantités utilisées, sécurisation des procédés par confinement des nanoparticules de façon à éviter leur mise en suspension dans l'air, ventilation et filtration adaptées des postes de travail, port de masques appropriés, ...).

Le CEA est appelé, dans sa mission de recherche et au nom du principe de précaution, à éclairer les questions relatives à la toxicité des nanoparticules

En vertu du principe de précaution, le CEA est sollicité, comme d'autres centres de recherche, pour augmenter les connaissances scientifiques concernant, au sens large, la toxicité des nanoparticules.

Il mobilise l'ensemble des disciplines scientifiques présentes dans l'organisme pour acquérir des connaissances sur le comportement des nanoparticules au cours de leur cycle de vie et en particulier leur comportement au contact du vivant. Le CEA est en effet l'un des rares organismes européens à réunir des chercheurs en sciences du vivant et en recherche technologique.

Au sein du programme Nanosciences du CEA, une trentaine d'équipes participent de façon plus ou moins permanente au projet Nanotox, dont l'objectif est d'acquérir des données de toxicologie de base sur les nanoparticules utilisées au CEA : nanotubes de carbone, nanoparticules à base de silicium, oxydes de titane, nanoparticules métalliques (platine). Des spécialistes de différentes disciplines – biologie, chimie, physico-chimie – étudient notamment la bio-distribution et la « pharmacocinétique » des nanoparticules, c'est-à-dire, s'il y a lieu, leur distribution dans le corps humain puis leur élimination, à partir de modèles *in vivo* ou *in vitro*.

Le CEA développe des procédés industriels destinés à réduire les risques de contact avec des nanoparticules

Dans son rôle de fournisseur de solutions technologiques à l'industrie, le CEA Grenoble via l'Institut Liten mène des actions focalisées sur le développement de procédés sécurisés tout au long du cycle de vie des nano-objets : fabrication, insertion éventuelle dans des objets macroscopiques, usage, traitement après usage.

Outre les travaux menés dans le cadre du projet Nanosafe 2 (voir

précédemment), on peut citer parmi les concepts nouveaux introduits pour réduire les risques de contact avec des nanoparticules :

- des procédés de fabrication « en phase liquide » dans lesquels les nanoparticules, hors des équipements, ne quittent jamais le liquide qui leur sert de vecteur, ce qui permet d'annuler le risque d'inhalation ;
- des procédés de traçage de nanoparticules. Il s'agit de marquer les nanoparticules pour assurer, malgré leur taille et leur indiscernabilité naturelle, leur localisation, leur identification, leur comptage.

ANNEXES

1- Le CEA, acteur de la recherche en nanosciences et nanotechnologies

2- Présentation du CEA-Liten

1- Le CEA, acteur de la recherche en nanosciences et nanotechnologies

Depuis sa création, en 1945, le CEA s'est intéressé à l'infiniment petit : l'atome et ses applications. Il étudie les propriétés et possibilités de cette brique élémentaire de la matière dans les trois grands domaines de recherche que sont l'énergie, la Défense et les technologies pour l'information et la santé. L'étude des propriétés les plus intimes de la matière a conduit le CEA vers les nanosciences et les nanotechnologies.

Le CEA est aujourd'hui l'un des acteurs majeurs de la recherche européenne dans ce domaine. Engagé dans la course mondiale à la miniaturisation de l'électronique, il a ainsi établi, en 1999, le record mondial du plus petit transistor (20 nanomètres). Avec l'Institut national polytechnique de Grenoble (INPG), le CEA est à l'origine du pôle Minatec®, premier centre européen, et l'un des premiers mondiaux, dédié aux micro-nanotechnologies. Inauguré en juin 2006 à Grenoble, le nouveau pôle est doté d'une plateforme d'instruments unique en Europe permettant aux chercheurs de voir, de manipuler et d'étudier les propriétés physiques des nano-objets. Les programmes de recherche de Minatec s'inscrivent dans la continuité des travaux menés depuis 40 ans par les chercheurs du CEA Léti (Laboratoire d'Electronique et de Technologies de l'Information) dans le domaine de la microélectronique.

Nanosciences et nanotechnologies au CEA

Aujourd'hui, ce sont près de 1 900 chercheurs qui travaillent au CEA à l'échelle du nanomètre (soit un milliardième de mètre). Nanosciences et nanotechnologies constituent un nouveau socle de l'innovation pour chacun des domaines dans lequel travaille le CEA. Les applications potentielles de ces recherches sont nombreuses, à commencer par le domaine de la santé, avec des bénéfices attendus en termes de diagnostic et de traitements. Les nanomatériaux permettront aussi de réaliser des avancées majeures dans les nouvelles technologies de l'énergie (solaire photovoltaïque, piles à combustible, etc.), les puces miniaturisées et intelligentes apporteront de nouvelles fonctionnalités dans l'automobile, l'aéronautique, les télécommunications, le multimédia grand public, etc.

Nanosciences : les recherches en nanosciences reposent sur un large éventail d'experts en physique, chimie et biologie qui travaillent ensemble sur la compréhension de phénomènes mettant en jeu des structures d'objets à l'échelle nanométrique. Elles couvrent à la fois les propriétés de la matière, mais aussi les procédés d'assemblage et de fabrication. Au CEA, elles sont menées au sein de la Direction des sciences de la matière (DSM), principalement à l'IRAMIS (Institut Rayonnement Matière Saclay) à Saclay et à l'INAC (Institut Nanosciences et Cryogénie) à Grenoble ;

Nanotechnologies : l'ensemble des savoir-faire qui permettent de travailler à l'échelle nanométrique ainsi que les nouveaux systèmes ou matériaux qui exploitent les propriétés des nano-objets. C'est au sein de la Direction de la

recherche technologique (DRT), sur le centre de Grenoble, qu'ont lieu ces recherches sur les nanotechnologies :

- le Léti (Laboratoire d'Electronique et des Technologies de l'Information) repousse les limites de la microélectronique, caractérisée par la fameuse loi de Moore³, vers les échelles nanométriques. Au sein du Léti, le département des Technologies pour la Biologie et la Santé développe de nouveaux objets à l'interface avec le vivant en direction des industriels de la santé et des cliniciens, en particulier dans le domaine du diagnostic et de l'imagerie médicale ;
- le Liten (Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies nouvelles et des Nanomatériaux) développe des nanomatériaux aux propriétés inédites et assure les transferts vers les industries de la chimie, de l'environnement et de l'énergie.

La multidisciplinarité au service de l'innovation

La frontière entre nanosciences et nanotechnologies n'est pas toujours parfaitement nette : la recherche fondamentale a besoin d'outils technologiques pour fabriquer et mesurer les objets étudiés ; la recherche technologique pose des problèmes fondamentaux aux chercheurs. Le va-et-vient est donc constant entre ces deux champs de recherche. Aussi le CEA a-t-il mis en place un programme transversal « Nanosciences » pour fédérer les compétences des différentes équipes concernées.

Les nanotechnologies facilitent également le rapprochement entre les disciplines scientifiques, donnant naissance à de nouveaux domaines de recherche. Ainsi, le rapprochement des sciences du vivant et des technologies de l'information a ouvert un large potentiel d'applications au service de la biologie et de la santé. Le CEA travaille aujourd'hui sur le développement de nouveaux outils miniaturisés pour le diagnostic et la recherche de nouveaux médicaments : biopuces, puces à cellules et « laboratoires sur puce ».

³ Formulée pour la première fois par Gordon E. Moore dans un [article de 1965](#), cette loi postule le doublement annuel des performances des circuits intégrés (mémoires et processeurs), grâce aux progrès de la photolithographie. Moore a revu son estimation en 1975 : le doublement aurait lieu tous les 18 mois et non tous les ans, ce qui correspond tout de même à une croissance très rapide. Cette "loi", fondée sur un constat empirique, s'est révélée étonnamment exacte. La miniaturisation ne devrait cependant pas se poursuivre indéfiniment. Lorsque les transistors atteindront une vingtaine de nanomètres, des effets « parasites » commenceront à se manifester et à perturber leur fonctionnement. Cette limite physique devrait être atteinte vers 2015 – 2020.

Participation aux échanges scientifiques

Le CEA s'implique dans différents programmes de recherche liés au développement des nanosciences / nanotechnologies :

- **Programme Nanosafe 2**
- Le CEA coordonne le **réseau d'excellence européen Nano2Life**, dont l'objectif est d'intégrer l'expertise européenne existante dans le domaine des nanobiotechnologies (biopuces, laboratoires sur puces, biocapteurs...) afin de rendre l'Europe plus concurrentielle dans ce domaine, y compris dans le transfert industriel.
- **L'Observatoire des Micro et Nano Technologies (OMNT)** est une unité mixte de service CNRS-CEA, créée en 2005 afin d'assurer une veille stratégique dans ces domaines.
La mission de l'Observatoire consiste à identifier les premiers signes annonciateurs des futures ruptures technologiques et fournir à la communauté française des micro et nanotechnologies les informations pertinentes pour le pilotage des projets de recherche ou industriels.
L'OMNT propose des analyses et des synthèses réalisées grâce à un réseau réunissant près de 250 experts scientifiques et techniques. Pour répondre à la complexité et à la multidisciplinarité inhérentes aux micro et nanotechnologies, le réseau de l'OMNT couvre une large gamme de compétences : biologistes, physiciens, chimistes, électroniciens, technologues, opticiens. Il accueille également des experts marketing afin de faire le lien entre les évolutions scientifiques et le monde économique.
Les travaux des experts de l'OMNT sont répartis en neuf thématiques : Instrumentation pour la biologie ; Electronique moléculaire ; Matériaux et Composants pour l'optique ; Microsources d'énergie ; Nanocomposants ; Nanoconstruction ; Electronique organique ; et, depuis 2007, NEMS (nanosystèmes électromécaniques) et la thématique "Nanoparticules, nanomatériaux, effets sur la santé et l'environnement"
L'OMNT est partenaire de 3 projets européens du 7^{ème} PCRD, ce qui lui permettra d'élargir un peu plus son champ d'activités et sa base d'experts existante à l'échelle européenne.

Un dossier de presse a été réalisé lors du séminaire de l'OMNT en février 2008 ; il est disponible sur le site Internet du CEA :

<http://www.cea.fr/presse>.

Le CEA dans le débat

Les centres du CEA impliqués dans ces recherches organisent de nombreuses rencontres avec le public, en particulier avec les jeunes : ateliers pédagogiques, conférences débats.

Le CEA participe également aux initiatives extérieures :

- réponse aux consultations de l'Office parlementaire des choix scientifiques et techniques ;
- participation aux débats publics organisés par la Metro (agglomération de communes de Grenoble), les conseils régionaux d'Ile-de-France et de Rhône-Alpes, la Cité des Sciences et de l'Industrie, le cycle Nanoviv (Metro), etc ;
- interventions dans les medias ;
- soutien scientifique à l'organisation d'expositions vers le grand public (ex : ExpoNano au CCSTI à Grenoble et à la Villette) ;
- débats citoyens et associatifs (par ex. Bar des sciences) ;
- interventions dans les écoles et les lycées (à Grenoble 'Croque Sciences' et 'Recherche fait école', par ex.).

Enfin, la direction de la communication édite régulièrement des documents de vulgarisation sur cette thématique.



Afin de répondre aux questions que se pose aujourd'hui la société vis-à-vis de la science, le CEA a créé, fin 2006, le Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (LARSIM), dirigé par le physicien et philosophe Etienne Klein. Son objectif est de reconnecter l'actualité de la recherche (les nanotechnologies par exemple) avec la société, d'aider les scientifiques à réfléchir à l'impact sociétal de leurs travaux et d'expliquer au public les enjeux des recherches scientifiques.

A Grenoble, le MINATEC IDEAs Laboratory® associe des experts du CEA, des industriels et des chercheurs en sciences humaines et sociales pour imaginer et concevoir les produits et services qui auront recours demain aux micros et nanotechnologies. Le centre de Grenoble participe aussi au 'UmanLab', équipe de recherche en sciences sociales pour accompagner les développements technologiques, avec l'université Pierre Mendès-France.

Le CEA est présent, d'une façon générale, dans le débat sur les nanosciences.

2- Présentation du CEA-Liten



Institut Liten : Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les nanomatériaux

Laboratoire du CEA implanté principalement à Grenoble et Chambéry (INES), le Liten (Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les nanomatériaux), est l'un des plus importants et plus jeunes centres européens de recherche sur les nouvelles technologies de l'énergie.

Sa mission : soutenir l'effort français de diversification énergétique par une meilleure intégration des énergies renouvelables notamment pour les besoins en énergie du transport, de l'habitat et de l'électronique nomade.

Interlocuteur incontournable du monde industriel - 350 contrats de recherche partenariale menés chaque année -, le Liten est également l'un des laboratoires du CEA qui dépose un grand nombre de brevets (74 en 2007, environ 90 en 2008) et gère un portefeuille de 250 brevets étendus au niveau international.

Les activités du Liten sont centrées sur l'énergie solaire, l'hydrogène et la pile à combustible, le stockage de l'énergie et les nanomatériaux, à l'origine de nombreuses ruptures technologiques dans le domaine de l'énergie. Elles concernent principalement :

- l'énergie solaire (élaboration de Si de grade solaire photovoltaïque, augmentation du rendement des cellules solaires photovoltaïques, systèmes électriques, solaire thermique, intégration dans des bâtiments à énergie positive, systèmes thermiques) ;
- les technologies pour le transport électrique, notamment la motorisation électrique (piles à combustible, batteries Li, production d'hydrogène, dépollution, utilisation rationnelle de l'énergie) ;
- l'électronique grande surface (micro-sources d'énergie, électronique organique, nano-objets).

550 personnes au service de l'innovation et du transfert de technologie vers les industriels

Fort d'un budget 2008 de 70 millions d'euros, le Liten emploie 400 personnes en contrat à durée indéterminée auxquelles s'ajoutent plus de 150 collaborateurs en formation (thésards, post-doc, CDD). Le chiffre d'affaires du Liten progresse d'environ 30 % par an depuis 2006 avec une prévision 2008 proche de 45 M€ et 55 M€ pour 2009.

Il dispose de moyens technologiques importants avec des salles blanches dédiées aux recherches sur les nanomatériaux, sur le solaire photovoltaïque ainsi que des équipements lourds de caractérisation et de test pour l'hydrogène et les piles à combustible. Il a également accès aux autres installations du CEA Grenoble, notamment le LETI, MINATEC, le polygone scientifique : réacteurs, accélérateurs, moyens d'analyse et de caractérisation, etc.

Les plateformes technologiques et les centres d'excellence

L'avenir du Liten se construit à l'échelle internationale dans le cadre de Tenerrdis, pôle de compétitivité des énergies renouvelables, dont il est l'un des principaux acteurs. Par ailleurs le Liten développe des plateformes technologiques avec des partenaires de recherche et des industriels : FCLab (piles à combustible pour les transports) à Belfort, D2M-ISIS (traitements des surfaces) à Saint Etienne.. Enfin, le Liten est le principal contributeur de l'INES (Institut National de l'Energie Solaire) avec plus de 150 personnes sur site.