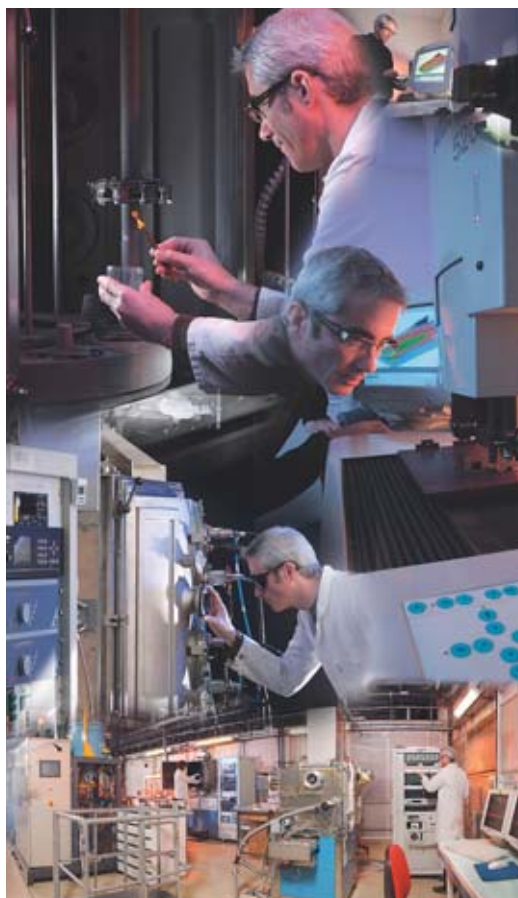


Enjeux, avenues de progrès et priorités du programme transversal sur les matériaux avancés au CEA

La plupart des programmes du CEA, notamment ceux en charge de la préparation des énergies du futur (fission, fusion, énergies alternatives et efficacité énergétique), **exigent une maîtrise préalable de matériaux innovants**, que ce soit au niveau de la synthèse, de la prévision et du contrôle des propriétés ou de la prédictibilité du comportement sous diverses contraintes, parfois sévères, et dans la durée. Conscient des enjeux, mais aussi de l'importance des challenges à relever pour ces matériaux situés au cœur de la performance des composants, le CEA a mis en place un programme transversal « matériaux avancés ».



Installation de revêtement sous vide pour des applications de barrières environnementales.

Le programme transversal « matériaux avancés » du CEA ambitionne de coupler la production de connaissances scientifiques ou technologiques, en amont, avec les programmes orientés sur les applications dans les secteurs où la fertilisation croisée demeure possible (procédés, [simulation](#), caractérisa-

tion). Il ambitionne également d'assurer la pérennité, l'évolution, l'adaptation au besoin, de la capacité technologique du CEA dans le domaine des matériaux avancés. Souvent considérés par les concepteurs de systèmes complexes comme « l'intendance qui doit suivre », les matériaux figurent pourtant au cœur du processus d'innovation, en particulier pour les énergies du futur. Comme ces matériaux ne se trouvent que rarement tout prêts « sur une étagère », les chercheurs doivent donc les concevoir sur mesure, en fonction de l'application visée, et cela, à un coût acceptable, dans des conditions de respect de l'environnement et d'économie maximale des matières premières.

Né d'une analyse poussée des forces mais également des faiblesses, des risques, des opportunités, le programme transversal « matériaux avancés » s'est forgé une stratégie qu'il décline en dix priorités. Chacune vise à renforcer l'intégration de la recherche mais aussi à construire des passerelles entre les diverses disciplines touchant aux matériaux, souvent très cloisonnées – l'innovation en rupture se trouvant habituellement au confluent des cultures. Afin de développer une approche cohérente dans les secteurs clés, le « programme transversal » a entrepris la structuration de quatre plans de développement impliquant l'ensemble des pôles du CEA dans les domaines de la métallurgie haute performance, des [composites](#) et des [céramiques](#) avancées, de l'ingénierie des surfaces et, enfin, dans le domaine de la [synthèse](#) et de l'intégration d'édifices [nanométriques](#). Une animation scientifique s'est mise en place autour de ces plans de développement. Aujourd'hui, elle fédère plus de 450 chercheurs au sein du CEA.

Des matériaux pour les réacteurs du futur

En France, le développement de l'énergie nucléaire exige une connaissance de plus en plus approfondie des matériaux constituant les structures et les [assemblages combustibles](#) destinés aux réacteurs nucléaires.

Le CEA doit prévoir leur vieillissement dans un contexte d'allongement de la durée de vie des réacteurs. Qu'il s'agisse des **réacteurs de la 4^e génération** ou des futurs réacteurs de **fusion**, le fonctionnement de ces installations appelle la conception, la fabrication et la qualification de matériaux à hautes performances, dotés de limites de résistance accrues, en vue d'une utilisation au sein de milieux extrêmement agressifs combinant souvent haute température, forte **irradiation** et **corrosion**.

Repousser les limites actuelles de la compréhension du comportement des matériaux de structure et de combustible, à l'échelle **submicronique**, figure comme une étape indispensable pour :

- améliorer les prédictions sur la robustesse de comportement des matériaux dans les domaines où l'acquisition expérimentale des données reste difficile ;
- développer des matériaux innovants, capables de répondre à des cahiers des charges particulièrement sévères, élaborés pour les réacteurs du futur (Génération IV, fusion), tout en orientant les études de façon à éviter des étapes de recherche et de développement trop longues et coûteuses, mais aussi de réduire les délais de qualification des matériaux.

Ces défis majeurs appellent deux types d'approches complémentaires. L'une, empirique, repose sur le champ expérimental et l'identification des lois de comportement ; l'autre, théorique, passe par une compréhension systématique des phénomènes physiques mis en jeu et par leur **modélisation** destinée à mieux guider l'expérience nécessaire à la validation des modèles.

La métallurgie de haute performance occupe une place importante dans les problématiques posées par l'optimisation des systèmes nucléaires de la deuxième et de la troisième génération, mais également par le développement de matériaux résistants aux conditions extrêmes de la quatrième génération de réacteurs de **fusion** ou du futur réacteur de fusion. Parmi les grands objectifs de ce plan de développement, figure d'abord l'établissement d'une filière industrielle d'élaboration d'aciers nanorenforcés. Celle-ci recouvre, des études, très en amont, sur l'évolution des caractéristiques métallurgiques des matériaux en fonction de leurs paramètres d'élaboration ou des matériaux se trouvant sous l'influence de sollicitations extrêmes comme l'irradiation. Ce plan concerne également des aspects très technologiques comme l'extrapolation, à l'échelle pilote, voire industrielle, des procédés de mécanosynthèse ou le développement de technologies d'assemblage sans fusion. Enfin, ce plan prévoit l'investigation de routes métallurgiques alternatives au broyage, qui utilisent parfois des procédés issus du domaine de traitement de surface.

Un autre de ses volets concerne l'évaluation de nouvelles technologies de consolidation et de **frittage** des poudres (par exemple, le *Spark Plasma Sintering*), de mise en forme proche des côtes (*direct manufacturing*), de réalisation de matériaux à gradient de composition et donc de propriétés. Enfin, ce plan développera nécessairement une caractérisation adaptée aux différentes échelles de la simulation numérique ainsi que des outils de caractérisation *in situ* et en environnement de fonctionnement.



Élaboration de revêtements nanostructurés par projection thermique.

Les céramiques : de l'aéronautique au nucléaire

En ce qui concerne le développement de composites et de céramiques avancées, dans un premier temps, l'effort porte sur le développement de composites à matrices céramiques (CMC). Celles-ci devront satisfaire aux exigences extrêmes des applications nucléaires, souvent beaucoup plus contraignantes que celles dédiées au domaine aérospatial par exemple – en particulier, le problème d'étanchéité aux gaz de fission. En effet, ces applications nucléaires ne peuvent utiliser directement les produits à base de carbure de **silicium** (SiC/SiC) issus de l'industrie aéronautique car leurs propriétés sont insuffisantes. D'où le développement de matériaux spécifiques *nuclear grade*, dotés de propriétés **thermomécaniques** d'étanchéité aux gaz de fission et de non-réactivité vis-à-vis du combustible. Pour s'évader des voies classiques d'élaboration comme le **CVI** (pour *Chemical Vapor Infiltration*), les chercheurs explorent de nouvelles routes technologiques alternatives – par exemple, les procédés de caléfaction rapide ou les procédés mettant en œuvre des nanopoudres. Enfin, le CEA développe une veille scientifique active sur les céramiques présentant un « caractère ductile », à haute température, ainsi qu'une veille stratégique sur la maîtrise de la fabrication de composants clefs comme les fibres céramiques hautes performances.

L'ingénierie des surfaces à haute performance

Pour les programmes du CEA, il s'agit d'une discipline stratégique. Son premier objectif vise au développement de barrières environnementales de très hautes performances pour les milieux extrêmes : corrosion, hautes températures, irradiation, composants face au **plasma** dans le cas de la fusion... Autant de sollicitations qui parfois se combinent. Les chercheurs tentent une approche moins empirique pour le développement de nouveaux traitements de surface en bénéficiant des apports de la simulation numérique pour concevoir des surfaces « à la demande », en fonction d'un environnement de travail donné. Ce secteur de l'ingénierie des surfaces a considérablement évolué

Les nanotubes de carbone sont disposés en tapis superposés, permettant de nombreuses applications, de l'industrie (écrans plats, membranes PAC) à la Défense (ils deviennent de très bons capteurs de polluants chimiques lorsqu'on y greffe des molécules filtres).



C. Dupont / CEA

et progressé au cours de ces vingt dernières années. Cela tient, notamment, à l'avènement des procédés **PVD** (pour *Physical Vapor Deposition*) à fort taux d'ionisation, au développement de technologies de projection thermique de suspensions de nanopoudres ou encore aux technologies de **CVD** (pour *Chemical Vapor Deposition*) à base d'injection directe en mode pulsé de précurseurs liquides, par exemple. Aujourd'hui, le moment paraît propice pour revisiter, en détail, les technologies mais aussi pour développer l'hybridation des procédés—aucune solution technologique n'étant universelle.

Enfin, le développement exceptionnel des matériaux avancés destinés aux énergies alternatives, en particulier le **photovoltaïque en couches minces**, a fait que ces technologies se présentent désormais comme étant très stratégiques.

Passer de la recherche à l'industrie

De nombreux matériaux et composants dédiés aux futures applications énergétiques, notamment dans les domaines du photovoltaïque (cellules dites de 3^e génération), du stockage de l'énergie (en particu-

lier sous forme **électrochimique**) ou de la filière **hydrogène**, font ou vont faire appel à la synthèse et à l'intégration de nano-objets (nanopoudre, nanotubes, nanofils) dans les développements futurs. Le 4^e plan de développement affiche une double orientation. Tout d'abord, il s'agit d'évaluer, dans la plus grande objectivité, les technologies de synthèse des nano-objets (phase vapeur, voie liquide...) en conservant toujours à l'esprit leur nécessaire passage à l'échelle industrielle. Ensuite, ce plan devra également aboutir à un développement responsable et sécurisé des nanomatériaux. En la matière, le CEA fait figure de précurseur avec le programme *Nanosafe* consacré aux recherches sur la production et l'utilisation sécurisées des nanomatériaux en milieu industriel. Cette approche globale de la maîtrise des risques appelle à travailler, de manière simultanée :

- sur les domaines du développement des technologies de *monitoring* des nano-objets, à la fois pour la mesure d'exposition des travailleurs et pour le contrôle fin des procédés d'élaboration ;
- sur la définition de procédés de synthèse de plus en plus intégrés, évitant au maximum les discontinuités ;
- sur la toxicologie des nano-objets ;
- sur l'ensemble du cycle de vie des matériaux nanostructurés jusqu'à leur protocole de destruction ou de recyclage.

De plus, la contribution à l'activité et aux instances de normalisation figure comme l'un des aspects majeurs de ce domaine en pleine émergence s'adressant à l'ensemble des industriels. Dans ce mouvement, des outils d'évaluation technico-économique du *nanomanufacturing* sont développés, notamment pour évaluer le coût des mesures de sécurité et la viabilité économique de certains procédés.

Afin d'amplifier la recherche collaborative par l'adjonction de compétences, en amont et industrielles, une dynamique de projets partenariaux a été mise en place impliquant l'**Agence nationale de la recherche**, les Pôles de compétitivité, des programmes cadres européens, **OSEO**... De la même manière, afin de rationaliser les efforts, de limiter les coûts, de minimiser le temps d'accès aux résultats scientifiques et



A. Gonnin / CEA

Dipositif de laboratoire pour la synthèse de nanopoudres utilisant la technologie de pyrolyse laser.

techniques, un effort particulier a été entrepris et doit être poursuivi pour doter le CEA des meilleures alliances, tant en amont avec le soutien à un certain nombre de groupements de recherche (*Spark Plasma Sintering*, Verres, Pamir/Physique et application des matériaux sous irradiation) que sur le plan industriel. Dans le domaine de la technologie des matériaux, l'effort doit être continu. L'évolution des technologies d'élaboration et de mise en œuvre de ces matériaux impose de suivre, avec une attention particulière, les développements des technologies émergentes, économes en matières premières et en énergie, facilement reconfigurables et respectueuses de l'environnement. Le programme transversal renforce en permanence la capacité technologique du CEA, par la création de laboratoires communs avec des industriels ou académiques et de plateformes technologiques.

Comme d'autres secteurs, celui des matériaux appelle l'amplification de l'effort de veille scientifique, technologique et stratégique. Par exemple, la veille sur le développement de capteurs intégrés capables d'informer, en temps réel, sur l'état de vieillissement d'un matériau fonctionnant dans un environnement donné, constitue un champ d'investigation capital, notamment compte tenu des coûts engendrés par l'arrêt des installations et les opérations de maintenance. Au regard des perspectives de durabilité des composants, un champ d'investigation majeur concerne la veille sur le développement de matériaux autoréparants. Dans un contexte de mondialisation de la recherche, les technologies de l'information offrent un accès rapide à l'intégralité de la production scientifique et technique mondiale. De fait, l'outil de veille entraîne des gains de productivité absolument considérables et donc oriente le ressourcement scientifique et la recherche exploratoire.

La mise en place, par le programme transversal, d'un « challenge matériaux » de recherche exploratoire favorise le financement de projets très innovants, le lancement de nouvelles thématiques, l'exploration de nouvelles voies. Il favorise la prise de risques en finançant des « coups de sonde » sur des sujets d'innovation en rupture.

Le « challenge matériaux » alimente en innovations les quatre plans de développement en finançant des sujets de recherche en rupture. Il assure également un flux de recherche en amont sur des domaines moins transversaux (par exemple celui des verres) mais à forte résonance sociétale puisqu'il s'agit, en particulier, du conditionnement des déchets nucléaires et de la prédiction du comportement, à long terme, des matrices de stockage. Enfin, une priorité générique de ce programme transversal concerne la simulation numérique grâce à laquelle les chercheurs gagnent en temps et donc en économie sur des coûts expérimentaux parfois très lourds. Développée au meilleur niveau, la simulation numérique contribue fortement à la conception de nouveaux matériaux : par exemple, des catalyseurs, des électrolytes pour électrolyseurs, de nouvelles architectures pour le photovoltaïque, des matériaux autocicatrisants pour des environnements extrêmes... Elle intervient également dans la prédiction du comportement en environnement (irradiation, modélisation de la corrosion...) et pour optimiser les procédés d'élaboration (en particulier le passage à l'échelle industrielle des procédés clés



C. Dupont / CEA

Miniaturisation des tests de toxicité. Exposition de cellules aux nanomatériaux sous un poste de sécurité microbiologique pour travailler en conditions stériles.

comme la mécanosynthèse, les technologies d'assemblages, les nouveaux procédés de densification et de consolidation...).

Tous ces travaux, le CEA entend les valoriser en les mettant au service de la compétitivité industrielle nationale mais aussi en communiquant pour « faire savoir ses savoir-faire », pour diffuser les technologies des matériaux, soit directement dans le tissu industriel, soit en supportant l'émergence de *start up*. Tels sont les challenges et défis, certes difficiles à relever, mais combien passionnants, telles sont encore les priorités sur lesquelles le programme transversal « matériaux avancés » a décidé de focaliser son action et de cristalliser ses moyens.

> Frédéric Schuster

Directeur du Programme transversal
« matériaux avancés »
CEA Centre de Saclay