

Le CEA apparaît comme un opérateur essentiel de la puissance publique pour relever les deux défis liés à l'énergie et à l'environnement : la sécurité de l'approvisionnement énergétique et la lutte contre le changement climatique. La réponse à ces enjeux s'appuie sur un mix énergétique composé de trois secteurs clés : le nucléaire de fission, la fusion nucléaire contrôlée, les nouvelles technologies de l'énergie.

- Le nucléaire de fission : le CEA soutient, dans le cadre d'accords de collaboration, les demandes de R&D des industriels concernant le nucléaire de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> générations (accroissement de la durée de vie et des performances des réacteurs dans les meilleures conditions de sûreté, amont et aval du cycle). Il étudie la faisabilité des systèmes industriels de 4<sup>e</sup> génération, avec un effort important sur la filière des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium.
- La fusion nucléaire contrôlée : le projet international ITER sera implanté sur Cadarache. Le CEA participe au développement, à la construction et à l'exploitation, avec les coopérants du projet international et en s'appuyant sur les compétences scientifiques et techniques de ses équipes.
- Les nouvelles technologies de l'énergie : le CEA développe des bases technologiques pour la mise en place, à court terme, d'ambitieuses filières industrielles d'énergies nouvelles dotées d'une efficacité énergétique accrue. Celles-ci sont en phase avec les engagements du Grenelle de l'environnement, la stratégie de Lisbonne et la construction de l'Espace européen de la recherche. Les programmes du CEA ciblent les secteurs les plus consommateurs d'énergie (bâtiment et transports) en priorité sur les domaines du photovoltaïque et du stockage de l'énergie électrique, se déclinent selon une approche systémique visant des innovations de rupture et la réalisation de démonstrateurs.



Boîte à gants d'étude de composés d'actinides.



Recherche  
fondamentale

Cultures et manipulations de cyanobactéries.

# Énergies décarbonées



# Recherche fondamentale pour l'énergie

© C. Morel/Our Polar Heritage



© P. Avallan/CEA

De g. à dr. : dépouillement de données météorologiques dans le cadre du projet CarboOcean – salle d'analyse de l'interaction rayonnement-matière sur des échantillons métalliques.

Avec la conférence de Copenhague sur le climat en 2009, et au cours des derniers mois, la protection du climat, la remédiation (dite aussi *mitigation*), occupe une place croissante dans l'agenda politique. Plusieurs secteurs sont concernés, en premier lieu l'énergie et les transports, mais aussi le bâtiment, l'agriculture... Cet effort généralisé pour une gestion bas carbone des ressources s'accompagne d'une nécessaire préparation à un climat différent et ses conséquences, notamment les événements extrêmes. Il s'agit de l'*adaptation*.

Le CEA mène des recherches amont nécessaires aux développements de nouvelles sources d'énergie, non seulement dans le domaine de la fusion par confinement magnétique, mais aussi dans ceux de la chimie et des interactions rayonnement matière, en soutenant les nouvelles technologies de l'énergie ainsi qu'en définissant des concepts innovants pour les technologies bas carbone. Ces recherches sont complétées par une compétence reconnue à l'échelle mondiale sur les sciences du climat et de l'environnement.

# Le climat et la société

Le positionnement international très fort du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), unité mixte CEA/CNRS/UVSQ<sup>(1)</sup>, a été souligné en 2009 par l'évaluation de l'AERES<sup>(2)</sup>. Ses chercheurs participent aux travaux du Groupement intergouvernemental d'experts sur le climat et la préparation du prochain rapport du Giec est une de ses priorités. Parmi ses objectifs scientifiques majeurs figurent l'intégration de la contribution des aérosols au modèle global, la mesure et la compréhension des cycles biogéochimiques et en particulier celui du carbone (projet Icos), et l'obtention d'enregistrements à haute résolution du climat du passé pour des périodes clés. Avec le LSCE et le projet de pôle Climat-environnement-énergie, la recherche fondamentale pour l'énergie au CEA est particulièrement gréée pour répondre aux engagements du Grenelle de l'environnement.

## Une approche intégrée de la *mitigation*

Basé sur le plateau de Saclay, le pôle Climat-environnement-énergie est fondé sur la qualité des équipes de recherche fondamentale et finalisée ainsi que sur des échanges féconds entre l'enseignement supérieur, la recherche et l'innovation. Il porte l'ambition européenne et mondiale des partenaires du plateau de Saclay sur ces thématiques. En 2009, le pôle a commencé à structurer son action en organisant ses premiers séminaires interdisciplinaires sur des thèmes comme les réseaux électriques intelligents, la physique et la chimie pour la régénération du carbone ainsi que l'évaluation environnementale et économique des filières de bioénergies.

(1) UVSQ : université Versailles Saint-Quentin.

(2) AERES : Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur.



© C. Morel/Our Polar Heritage

Connexion des dernières lignes (air et standard de calibration) sur l'instrument de mesure en continu du CO<sub>2</sub>.

# Énergies décarbonées



Base Neem, dans le nord-ouest du Groenland.

### Modèle global pour le Giec

La collaboration internationale Margo, pilotée par le LSCE, a mis au point, en 2009, une reconstitution des températures de l'océan au cours du dernier maximum glaciaire, survenu il y a environ 20 000 ans, avec une fiabilité et une précision sans précédent. Grâce à cet ensemble unique de données, Margo va permettre de raffiner les modèles climatiques et mieux anticiper les changements à venir.

### Enregistrement climatique fiable par un forage à grande profondeur

La saison de forage 2009 sur le site de Neem, dans le nord-ouest de la calotte de glace groenlandaise, constitue un nouveau record mondial en termes de rapidité de forage glaciologique : plus de 1 750 mètres de profondeur dans le glacier ont été atteints en seulement 110 jours effectifs. Le projet Neem implique des laboratoires de 14 nations dont le LSCE. Le forage, qui devrait atteindre dans les années à venir le socle rocheux à 2 545 mètres sous le glacier, fournira un enregistrement climatique fiable de la précédente période interglaciaire (entre moins 120 000 et moins 130 000 ans). Les chercheurs pourront, entre autres, affiner leurs modèles de l'évolution future possible du niveau des mers en période climatique chaude.

<http://neem.nbi.ku.dk/>

### Institut européen de technologie

L'Institut européen de technologie (IET) a sélectionné le 16 décembre 2009 deux communautés de la connaissance et de l'innovation (Knowledge and Innovation Community, KIC) dans lesquelles le CEA est impliqué : Climate-KIC sur la lutte et l'adaptation au changement climatique et InnoEnergy sur l'énergie durable. Ces structures ont pour objectif d'accroître le potentiel d'innovation en Europe grâce à une vision cohérente d'une économie « durable », qui intègre la recherche et les éco-innovations, la formation à l'entrepreneuriat et l'émergence d'entreprises de technologie innovante.

### Icos : les flux de gaz à effet de serre

Le projet européen Icos (projet d'infrastructure européenne dédié à la mesure précise des flux de gaz à effet de serre) s'est poursuivi en phase préparatoire avec en 2009 la définition du cahier des charges du futur réseau de stations de mesure. Publié sur internet, le Carboscope fournit les flux de surfaces en CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> dérivés par trois équipes en Europe, calculés à l'aide des mesures atmosphériques, et permet une visualisation spatio-temporelle de ces flux.

<http://www.icos-infrastructure.eu/>



Station météo installée dans le cadre de la campagne Megapoli.

# Chimie & interaction rayonnement-matière

Préparer des nouveaux matériaux est une des clés des technologies futures de l'énergie. Dans ce but, il est essentiel d'explorer le comportement de la matière, notamment lorsqu'elle est soumise à des conditions extrêmes. D'où l'importance des recherches en vue d'utiliser des rayonnements pour sonder la matière à différentes échelles et dans le développement de nouvelles sources, en particulier avec des lasers à impulsions ultra-courtes (femtoseconde).

## Imagerie X femtoseconde à l'échelle du nanomètre

Des chercheurs du CEA ont obtenu, pour la première fois, des images en rayons X à l'échelle nanométrique avec un seul tir femtoseconde ( $10^{-15}$  s) issu d'un dispositif laser compact de laboratoire. Cette première avec ce type d'instrument ouvre la voie à des études dynamiques, telles que la dynamique d'aimantation ou la réactivité chimique à l'échelle nanométrique et femtoseconde.

## Un matériau laser prometteur

Dans le but d'augmenter les performances des lasers de puissance, une équipe d'un laboratoire mixte CEA-CNRS-EnsiCaen-université de Caen a montré qu'en refroidissant à température cryogénique des cristaux de fluorure de calcium ( $\text{CaF}_2$ ) dopée  $\text{Yb}^{3+}$ , des performances inédites peuvent être atteintes : rendement lumineux supérieur à 80 % et tenue en flux record, tout en autorisant une large accordabilité en longueur d'onde. Les résultats obtenus intéressent plusieurs sociétés et organismes de recherche, en particulier dans la perspective des projets européens HIPER (European High Power Laser Energy Research Facility) et ELI (Extreme Light European Infrastructure).

© P.F. Gosjain/CEA



© P. Avastian/CEA

De g. à dr. : enceinte de génération du rayonnement harmonique du laser PLFA – banc de test pour les piles à combustible.

## S'affranchir du platine dans la filière hydrogène

Les équipes du CEA ont obtenu des résultats expérimentaux et en modélisation significatifs dans la mise au point de molécules catalytiques sans platine. Leur but est de développer un matériau capable de catalyser sans platine aussi bien la production d'hydrogène que son utilisation dans les piles à combustible. Le remplacement du platine, métal rare et précieux, dans ces procédés offrirait la perspective d'une économie de l'hydrogène plus compétitive.

Un nouveau composé à base de nickel a été synthétisé en combinant nanosciences et chimie bio-inspirée. Le matériau se révèle stable et capable de fonctionner en milieu très acide, ce qui lui permet d'être compatible avec les membranes échangeuses de protons, utilisées de manière quasi universelle dans les piles à combustible fonctionnant à basse température.

Quant à la modélisation, elle a permis de dégager des pistes pour modifier la molécule de façon à ce que toutes ses formes géométriques présentent une activité catalytique optimale. Ces travaux ont été brevetés et publiés dans la revue *Science*.

# Énergies décarbonées

# La radiobiologie

## Connaître les effets des rayonnements sur le vivant

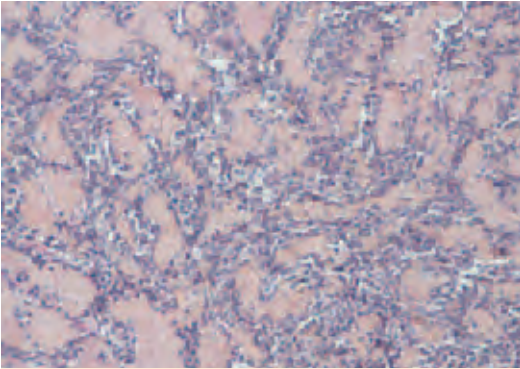


© F. Rhodés/CEA

À Fontenay-aux-Roses, le CEA dispose d'un plateau technique d'irradiation optimisé pour les très faibles doses et offrant un large spectre de débit de dose.

Les recherches en radiobiologie visent à connaître les effets des rayonnements ionisants sur le vivant, à ses différents niveaux d'organisation. Les résultats des recherches des équipes du CEA dans ce domaine contribuent à l'évaluation à court et à long termes des risques liés aux activités nucléaires et, par là même, participent à l'élaboration de la réglementation nucléaire internationale, notamment en radioprotection. Afin de disposer de méthodes de comparaison adaptées en fonction des doses de rayonnement reçues, les laboratoires du CEA adoptent différentes approches, comme la génomique fonctionnelle, la génomique structurale, la protéomique, l'analyse haut débit.

Un effort particulier est porté sur l'évaluation des effets des faibles doses de rayonnement pour lesquels de nombreuses questions restent en suspens, notamment celle de l'influence de la susceptibilité individuelle sur le développement d'une maladie radio-induite. Dans ce contexte, le CEA a participé à la création d'un groupe européen des experts de haut niveau (HLEG) pour établir une feuille de route commune concernant la recherche sur les faibles doses. Ces travaux se sont concrétisés par l'organisation, en octobre 2009, d'un premier *workshop* européen à Stuttgart et par la mise en place d'une structure de gouvernance transnationale de la recherche dans le domaine des faibles doses, baptisée Melodi pour Multidisciplinary European Low Dose Initiative.



### IDENTIFICATION D'ANOMALIES GÉNÉTIQUES DANS LES OSTÉOSARCOMES RADIO-INDUITS



L'ostéosarcome est le cancer des os le plus répandu chez l'enfant. Il semble provenir d'un dérèglement des ostéoblastes, cellules permettant la formation du tissu osseux. Des études montrent qu'il apparaît fréquemment après une exposition aux rayonnements ionisants. Afin de mieux comprendre les bases moléculaires à l'origine du développement de ces cancers radio-induits, des chercheurs de l'Institut de radiobiologie cellulaire et moléculaire ont comparé l'expression génique de tumeurs et d'ostéoblastes chez le rat. Les résultats montrent une variation significative de l'expression de 72 gènes. Certains sont impliqués dans les processus d'adhésion et de différenciation cellulaire; d'autres sont des gènes suppresseurs de tumeurs. Une autre altération génétique concerne le processus de régulation de la  $\beta$  caténine, une protéine connue pour contribuer à la prolifération tumorale et pour stimuler la transcription de gènes impliqués dans la cancérogenèse. Ces travaux ouvrent des perspectives d'identification de nouveaux marqueurs moléculaires pour améliorer le diagnostic, le pronostic ou le traitement de ces cancers chez l'homme.

## La toxicologie

### Déterminer l'impact des technologies issues du CEA sur l'homme et son environnement



Analyse par chromatographie couche mince pour le programme Toxicologie nucléaire.

La toxicologie est une science importante au CEA, directement liée à ses responsabilités en tant que producteur ou utilisateur de nouveaux procédés technologiques dont l'impact sur l'environnement et la santé n'est pas ou peu connu.

La toxicologie nucléaire, en particulier, a pour objet de comprendre les effets toxiques des éléments utilisés dans la recherche et l'industrie nucléaire (radionucléides,

# Énergies

## décarbonées

## SCIENCES DU VIVANT LA TOXICOLOGIE

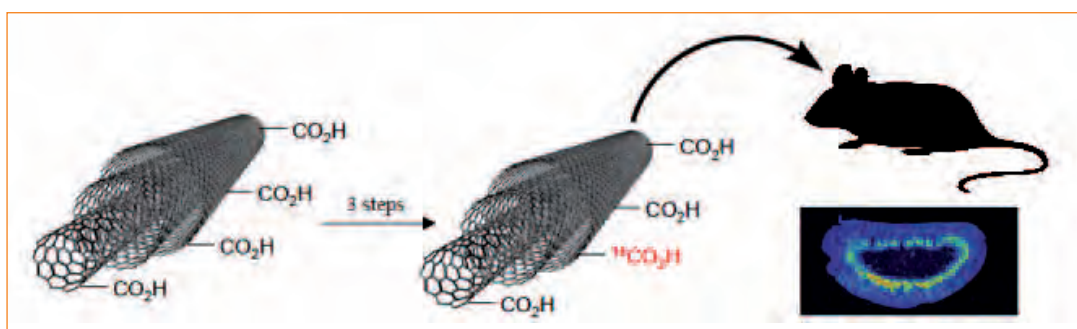
© F. Rhodes/CEA



métaux lourds) ainsi que leur mode d'action. Le CEA a fait la preuve de ses compétences dans ce domaine au travers de deux programmes menés en interne et en partenariat avec d'autres établissements de recherche : les programmes ToxNuc 1 et 2 menés de 2004 à 2007. Cette compétence s'est élargie à d'autres domaines de recherche, comme les nanomatériaux. En 2009, une nouvelle étape a été franchie avec la création au sein du CEA d'un programme transverse entièrement dédié à la toxicologie dont le pilotage a été confié à la Direction des sciences du vivant (cf. page 36).

Dans le domaine des sciences du vivant, les études de toxicologie se concentrent principalement sur les rayonnements ionisants, les radionucléides (effets chimiques et radiologiques) et les nanomatériaux afin d'acquérir les connaissances fondamentales

Cultures et manipulations génétiques de cyanobactéries.



### LOCALISATION *IN VIVO* DE NANOTUBES DE CARBONE MARQUÉS



Les nanotubes de carbone suscitent de nombreux espoirs industriels mais, comme tous les objets de taille « nano », la question de leur toxicité reste posée. Des chercheurs du CEA (iBiTec-S, Iramis : Institut de biologie et de technologies de Saclay et Institut rayonnement-matière de Saclay) ont développé un procédé permettant de marquer des nanotubes de carbone avec des atomes radioactifs de carbone ( $^{14}\text{C}$ ), sans altérer leur structure et leurs propriétés. Grâce à des imageurs capables de détecter et de quantifier ce radioélément, il est désormais possible de localiser *in vivo* ces nano-objets et de déterminer leur persistance au sein de l'organisme ; persistance qui peut conduire à long terme au développement de pathologies. Cette méthode a été appliquée à des rats. L'analyse de leur biodistribution a montré que ces nano-objets s'accumulent principalement dans le foie et les poumons et qu'ils sont lentement éliminés de l'organisme.

*Journal of the American Chemical Society*, sept. 2009.



# Énergies décarbonées

# Systemes nucléaires du futur de 4<sup>e</sup> génération



© P. Stroppa/CEA

Étude sur les matériaux pour la génération IV de réacteurs.

## Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na)

Le réacteur rapide refroidi au sodium (RNR-Na) est la filière de référence pour le programme sur les réacteurs de 4<sup>e</sup> génération. Le prototype Astrid, Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration, a un objectif de démonstration des avancées à l'échelle industrielle en qualifiant des innovations majeures. Ses capacités de transmutation de déchets radioactifs permettront de poursuivre la démonstration de faisabilité de cette technique de réduction du volume et de la dangerosité des déchets ultimes, à l'échelle industrielle. Il devra enfin permettre de réaliser des irradiations expérimentales en spectre de neutrons rapides.

En 2009, dix synthèses tripartites sur le RNR-Na ont été produites, concluant trois années de R&D consacrées aux innovations. Les orientations des études et de la R&D sont proposées en vue du choix, en 2010, de l'image de référence d'Astrid et des options qui resteront ouvertes. Ces dix synthèses concernent les options de chaudière (réacteur à boucle, intégré, autres concepts, modularité), certains systèmes (la manutention, l'ISIR), la conception du cœur, les matériaux pour le cœur et les structures.

## Réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz (RNR-G)

Le réacteur rapide refroidi au gaz (RNR-G) constitue la filière alternative à long terme. L'objectif est d'en démontrer la faisabilité dans un contexte de collaboration européenne. La recherche se concentre sur la mise au point du combustible réfractaire du

RNR-G et les études de sûreté associées. Par ailleurs, les études conceptuelles sur un réacteur expérimental de quelques dizaines de MWth (Allegro) se poursuivent dans un cadre européen, pour une construction dans un pays de la Communauté à partir de 2025.

Les principaux sujets abordés en 2009 concernent les matériaux, la technologie liée au caloporteur hélium, le design et la sûreté. Concernant les études de cœur, il apparaît qu'une puissance de 75 MWth avec un cœur chargé en MOX permettrait d'atteindre des performances suffisantes pour évaluer le concept et qualifier les combustibles innovants envisagés.

## Évaluation technico-économique des scénarios

Dans le cadre de la loi de juin 2006 sur la gestion durable des matières et déchets radioactifs, des scénarios électronucléaires prospectifs sont évalués pour participer à l'analyse technique mais aussi à l'analyse multicritère des différentes options de transmutation.

Les études effectuées en 2009 considèrent le déploiement des RNR-Na à partir de 2040, selon différents scénarios de recyclage du plutonium (seul ou avec les actinides mineurs). Une analyse économique de ces scénarios a été également conduite pour permettre leur comparaison. Une série de rapports de synthèse sur les études techniques de scénarios ont été émis en 2009.



Crayons combustibles.

© P. Stroppa/CEA

# Soutien au nucléaire industriel



De g. à dr. : manutention en piscine du réacteur Osiris – préparation d'un programme de mesures dimensionnelles sur des combustibles irradiés – boîte à gants de soudage laser de gaines contenant les pastilles.

## Réacteurs, combustible et sûreté

Les programmes de recherche en soutien au nucléaire industriel, aussi bien dans le cadre de l'exploitation du parc existant que pour la 3<sup>e</sup> génération, répondent prioritairement aux besoins des partenaires industriels (EDF, Areva, GDF Suez) et des organismes de recherche (Andra, IRSN). Le CEA développe une R&D de premier plan pour contribuer à la justification de l'aptitude au service des grands composants (cuves, internes, enceintes) au-delà de 40 ans de fonctionnement, à l'amélioration des performances du parc nucléaire et de sa sûreté. En 2009, une synthèse de l'ensemble des résultats acquis dans le cadre de l'expérience Diva (action coopérative CEA-Areva-EDF) a notamment été réalisée. Cette expérience, qui

s'est déroulée dans le réacteur expérimental Osiris à Saclay, est la première permettant d'accéder au comportement mécanique de l'acier de cuve à une fluence représentative de 60 ans de fonctionnement. Les résultats de mécanique obtenus sur les différentes microstructures montrent que les règles de conception et de construction (RCC-M) restent conservatrices pour des fluences bien supérieures à leur domaine de qualification. Pour l'assemblage combustible, dans le contexte d'augmentation de la compétitivité du parc électronucléaire, les enjeux sont l'amélioration de la performance, de la robustesse et de la sûreté, en conditions normales et accidentelles. Une expérience d'irradiation de combustible, Merci, a été réalisée en 2009 dans le réacteur Osiris à Saclay pour conforter les valeurs de puissance résiduelle utilisées par EDF pour la gestion du combustible. Le

bilan scientifique de cette expérience inédite a été tout à fait satisfaisant, que ce soit en termes de validation des principes de base, de fonctionnement de l'instrumentation et de précision des mesures calorimétriques. Un autre fait marquant pour l'année 2009 a été le résultat des calculs d'intercomparaison obtenus avec l'outil de simulation Cathare 2, dans le cadre du programme ROSA-2 de l'OCDE. Un transitoire d'accident de perte de réfrigérant primaire a été calculé avant la réalisation expérimentale du même transitoire sur l'installation japonaise LSTF de JAEA. Parmi les six participants et les quatre codes utilisés, seul le CEA a mis en évidence, avec Cathare, un phénomène de remontée de la pression primaire et a su prédire l'échauffement du cœur. Les calculs du CEA se sont trouvés en très bonne adéquation avec les résultats expérimentaux. Des développements complémentaires ont été réalisés pour améliorer la portabilité du code sur les machines de calculs et les simulateurs utilisés par les industriels. Les modifications ont été livrées aux industriels en novembre 2009.

## Traitement des combustibles usés

Grâce à un partenariat avec le CEA fort de 30 ans d'exploitation industrielle et de R&D conjoints, Areva est aujourd'hui leader dans le domaine du traitement-recyclage du combustible usé. Les enjeux consistent à la fois à garantir le fonctionnement actuel de l'usine de la Hague, tout en optimisant le procédé de façon à rationaliser les consommables, les déchets produits et en l'adaptant à la variabilité de la nature des combustibles à traiter. Dans le cadre du projet « vitrification 2010 » conduit par Areva pour l'augmentation de capacité des chaînes de vitrification et pour l'implantation d'un creuset froid à la Hague, les essais inactifs du creuset froid implanté dans la chaîne B de l'atelier R7 se sont déroulés avec succès en 2009 grâce aux résultats des nombreux essais sur maquettes réalisés à Marcoule. Le développement du nouveau procédé de traitement de combustible usé COEX™ s'est poursuivi; ce procédé évite la séparation du plutonium purifié et produit directement un oxyde mixte (U, Pu) O<sub>2</sub>. En 2009, plusieurs lots de poudres ont été produits dans l'installation Atalante à Marcoule, puis transférés à Cadarache et à la chaîne LCT de Melox, et les pastilles de combustible finalement obtenues respectent parfaitement les spécifications.

# La gestion durable des matières et déchets radioactifs

La loi du 28 juin 2006 précise les étapes de mise en œuvre des solutions pour la gestion durable des matières et déchets radioactifs et oriente la R&D confiée au CEA dans deux domaines complémentaires, la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue.

Les études relatives au traitement des combustibles usés visent à séparer les éléments transuraniens pour les isoler des déchets ultimes. Deux modes de récupération sont étudiés :

- la séparation poussée des actinides mineurs (Am, Np, Cm) ;
- la séparation groupée des éléments transuraniens (Pu, Am, Np, Cm) avec le concept Ganex développé dans l'optique d'un recyclage homogène des actinides en réacteur de 4<sup>e</sup> génération.

Les principales réalisations de 2009 concernent la mise au point de procédés de séparation adaptés aux diverses options de recyclage des actinides : la consolidation du procédé Ganex d'extraction globale de l'ensemble des

© A. Gonin/CEA



De g. à dr. : appareil de diffraction X pour la fabrication par voie sèche de combustibles – chaîne blindée permettant d'étudier le retraitement des combustibles irradiés.

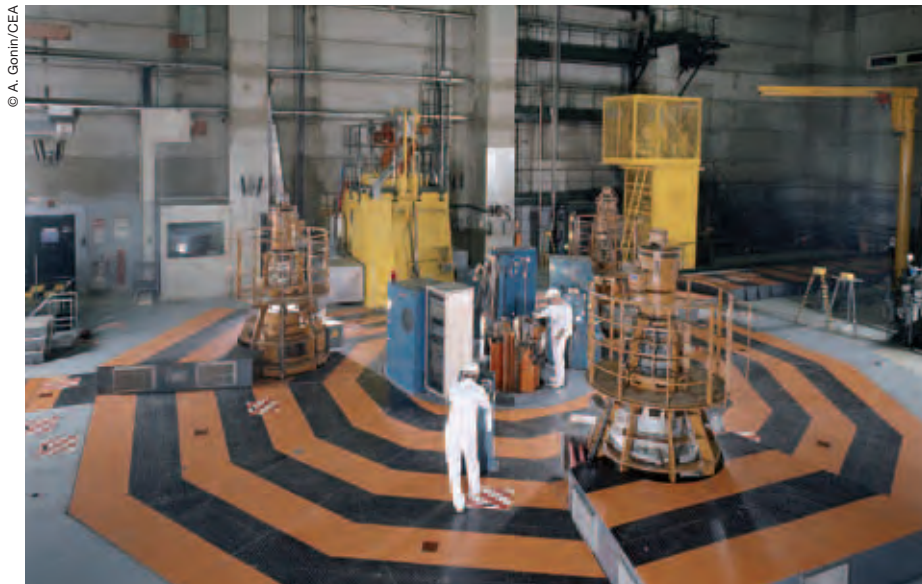
actinides s'est poursuivie ainsi que le développement d'un schéma de procédé visant à la récupération du seul américium, principal contributeur à la radiotoxicité à long terme et à la charge thermique des colis de stockage. Le procédé ExAm (pour extraction de l'américium) mis au point au CEA à Mar-



© A. Gonin/CEA

coule a fait l'objet de deux dépôts de brevet en 2009. Un essai de ce procédé innovant a été réalisé en 2009 avec succès dans le laboratoire L17 d'Atalante. L'américium a été récupéré quantitativement (> 97 %), avec un facteur de décontamination notablement supérieur à 1 000.

## Un ensemble cohérent d'outils pour la R&D



Hall du réacteur Phénix.

Les programmes de R&D nucléaire pour le soutien aux systèmes existants, ainsi que pour la préparation des systèmes futurs, nécessitent des outils expérimentaux adaptés et des outils de simulation numérique performants, prenant en compte l'aspect « multiphysique » de l'environnement en réacteurs.

### Réacteurs expérimentaux et labs chauds

Pour le soutien aux systèmes réacteurs existants comme pour la préparation des systèmes futurs, les programmes de R&D s'appuient sur un ensemble d'outils expérimentaux, principalement les réacteurs de recherche et les labs chauds.

Dans le domaine de l'étude du comportement des matériaux et des combustibles

sous irradiation, le réacteur Jules Horowitz (RJH) est destiné à prendre la suite du réacteur Osiris de Saclay. En début d'année 2009, la construction de l'îlot nucléaire a débuté : coulée du premier béton, bétonnage du fond de fouille, ferrailage et bétonnage du radier inférieur, mise en place des plots parasismiques et pose de leurs appuis. Le 12 octobre 2009, le Premier ministre a signé sa création par décret n° 2009-1219. L'exploitation de Phénix a pris fin en 2009. Un programme d'essais ultimes a été conduit avec succès, parmi lesquels l'essai de fonctionnement en circulation naturelle, l'essai de fusion partielle de combustible dans une capsule expérimentale, les essais de compréhension des phénomènes d'arrêt d'urgence par réactivité négative survenus en 1989-1990. Le parc des outils expérimentaux du CEA s'est enrichi en 2009 avec la mise en service à Saclay de l'installation Jannus (Jumelage d'accélérateurs pour les nanosciences, le nucléaire et la simulation) : l'accélérateur d'ions a été utilisé en mode « deux faisceaux » pour la première fois en août 2009 sur cibles réelles. Livré en 2009, le 3<sup>e</sup> faisceau permettra le fonctionnement de l'installation en triple faisceau en 2010. Cette expérience se plaçait dans le cadre de la collaboration entre le CEA et le Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL).

## Simulation

La simulation numérique repose sur un ensemble de plates-formes logicielles



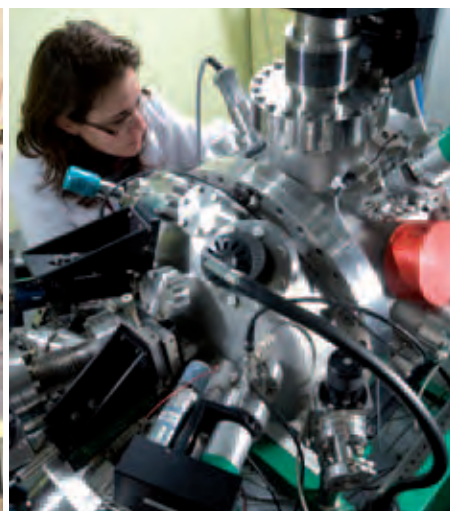
De g. à dr. : chantier de construction du réacteur Jules Horowitz (RJH) – installation Jannus.

polyvalentes, développées en partenariats français et international. Les grands défis de la simulation numérique se déclinent selon ces plates-formes et leur combinaison.

– Une première famille correspond aux cinq grandes disciplines du nucléaire : neutronique, thermohydraulique, comportement des matériaux sous irradiation, mécanique des structures, chimie.

– La deuxième famille est multidisciplinaire. Intégrant des couplages entre les plates-formes de la première famille, elles sont destinées à des applications spécifiques.

En neutronique, destinés à illustrer la vocation multifilière du code Apollo3, des



premiers calculs de cœur en cinétique 3D pour des réacteurs à neutrons rapides ont été réalisés en 2009.

Concernant les plates-formes, celle d'intégration des logiciels Salome, codéveloppée par le CEA et EDF, a bénéficié d'une nouvelle version en 2009, avec de nouvelles fonctionnalités pour le calcul parallèle et une interface homme-machine améliorée. Le projet collaboratif Nurisp dans le cadre du 7<sup>e</sup> PCRD a débuté en 2009 : coordonné par le CEA, il permet de poursuivre le développement européen de la plate-forme de référence Nuresim qui intègre 13 logiciels dont huit issus du CEA.

# Assainissement et démantèlement



Techniciens immergeant un robot dans une piscine de l'installation MAR 400, en cours de démantèlement.

Conduire la R&D dans le domaine nucléaire implique de mener en parallèle des programmes de construction et de rénovation d'installations et des programmes de démantèlement des installations en fin de vie. Gérer ce démantèlement de façon responsable est un des objectifs majeurs du CEA et une exigence pour la renaissance du nucléaire.

Le programme d'assainissement et de démantèlement des centres civils du CEA concerne la gestion des combustibles usés, la reprise et le conditionnement des déchets anciens et l'assainissement-démantèlement des installations nucléaires du CEA civil, ainsi que l'usine de traitement des combustibles usés UP1 de Marcoule.

Parmi les faits marquants de 2009, on notera :

– les travaux d'assainissement-démantèlement du site de Marcoule qui se sont

## ÉNERGIE DE FISSION ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT

© A. Gornin/CEA



© F. Vigouroux/CEA

De g. à dr. : le laboratoire Petrus était dédié au traitement des cibles irradiées pour la production de transuraniens – contrôle radiologique d'un camion par un radioprotectionniste.

poursuivis avec des résultats notables – rinçage de quatre anciennes piscines de MAR 400 qui accueillait, en leur temps, les combustibles UNGG, ou encore démantèlement des cuves « procédés » de dissolution dans l'ancienne usine UP1 ;

- la poursuite du projet Passage, projet de dénucléarisation du site de Grenoble avec une étape marquante en 2009, le premier transport de déchets irradiants de l'INB 79 du centre CEA-Grenoble vers le centre CEA-Saclay ;
- l'achèvement d'une des principales opérations d'assainissement-démantèlement de l'ancien laboratoire de chimie du plutonium de Fontenay-aux-Roses, avec la fin de l'assainissement de la chaîne Petrus et la vidange de la cuve B. La complexité de cette opération tenait à l'inaccessibilité de la salle des cuves et aussi à la vétusté des installations, inutilisées depuis plus de 30 ans. D'où le recours à la modélisation, à la réalisation de maquettes, à la conception d'outils de découpe et de relevage, ainsi qu'à des essais de dissolution et à la mise en place de systèmes de relevage et d'inertage, confinés dans des boîtes à gants ergonomiques, qui a permis de finalement aboutir à ce résultat, étape majeure dans le



© CEA

projet Aladin de dénucléarisation du site de Fontenay-aux-Roses ;

- la création du groupement d'intérêt public (GIP) Sources HA entre le CEA et Cisbio parue au *Journal officiel* du 12 juin 2009. Ce GIP aura pour missions les relations avec les utilisateurs de sources de haute activité (ex. cobalt 60 et césium 137), les opérations de collecte et de transport, de conditionnement en colis de déchets agréés par l'Andra, le démantèlement éventuel des équipements ayant contenu les sources, l'entreposage et l'évacuation vers les sites de stockages de l'Andra ainsi que la gestion administrative et réglementaire associée à ces missions ;
- en novembre 2009 a débuté le désentreposage des fûts plutonifères de l'installation Pegase (première installation nucléaire de base construite sur le site de Cadarache et qui a abrité le réacteur expérimental Pegase) ; ces fûts ont été transférés vers l'installation Cedra de Cadarache, en attente de leur transfert à l'Andra.

Piscine d'entreposage de combustible Pegase.

© P. Stroppa/CEA



### L'INAUGURATION DE L'ICSM

L'Institut de chimie séparative de Marcoule (ICSM) a été inauguré en juin 2009 par la ministre de l'Enseignement supérieur et de la recherche. Unité de recherche multipartite (CEA, université de Montpellier, école nationale de chimie, CNRS), ses équipes mènent des travaux innovants sur les connaissances génériques de base pour la chimie séparative et les matériaux, en utilisant le plateau technique de l'ICSM, en cours d'équipement et en s'appuyant sur les installations du centre de Marcoule où sont concentrées les études sur l'aval du cycle avec notamment l'installation Atalante.



# Un besoin interdisciplinaire



© P. Stroppa/CEA

Maintenance sur l'installation Tore Supra.

Au plan national, le CEA constitue le point d'entrée unique pour l'ensemble des activités de fusion (CNRS et universités). De fait, ses relations privilégiées avec le milieu académique permettent au CEA de mobiliser toute la communauté nationale dans la perspective d'ITER, en cours de construction à Cadarache. Cela concerne aussi bien la recherche conduite avec la fédération de recherche « fusion magnétique » que la mise en place d'un master « sciences de la fusion ».

Les équipes du CEA poursuivent des recherches pour la compréhension fondamentale de la physique des plasmas : elles mettent en œuvre modélisations et expériences au service de la théorie ainsi que des développements technologiques pour la maîtrise de plasmas de haute performance et de longue durée.

Depuis plus de 20 ans, Tore Supra, installation unique au monde, leur permet de développer une expertise scientifique et technologique sans précédent sur le fonctionnement en continu d'un réacteur de fusion.

## Expérience et modélisation pour des plasmas plus denses et plus chauds

Installée en août 2009 sur Tore Supra, l'antenne C4 va permettre d'obtenir des plasmas encore plus longs, plus chauds et plus

denses que ceux obtenus jusqu'à présent, pour une meilleure compréhension des plasmas stationnaires continus. Les mesures de fluctuations dans le plasma sur Tore Supra ont permis de caractériser les mécanismes de turbulence. Les spectres de fluctuations expérimentaux ont été modélisés avec le code Gysela, en développement au CEA. Un autre code du CEA, Jorek, a permis de progresser dans la compréhension de la physique des instabilités.



© F. Vignaud/CEA

Station d'essai des aimants du W7X.

## Développer des technologies pour ITER et les futures machines

Dans le but de contrôler la position du plasma dans la chambre d'un tokamak, une équipe du CEA, en collaboration avec le laboratoire belge SCK-CEN, a installé sur Tore Supra un capteur d'un type nouveau qui mesure le courant circulant dans le plasma.

Dans le cadre des projets financés par l'Agence Fusion for Energy (F4E) et ITER Organization (IO), les équipes du CEA prennent part aux études de la couverture tritigène, composant clé des futurs réacteurs de fusion, en proposant un premier dessin et sa protection.

Grâce à la simulation numérique, des équipes du CEA ont démontré la possibilité d'accélérer des faisceaux intenses de noyaux de deutérium dans différentes structures accélératrices, comme prévu dans le futur accélérateur Ifmif conçu pour tester les matériaux pour les futurs réacteurs à fusion. Le modèle complet est le fruit d'une collaboration européenne associant le CEA, l'INFN-Legnaro en Italie et le Ciemat-Madrid en Espagne.

La dernière bobine du stellarator Wendelstein 7-X, machine de recherche du programme européen W7 de fusion située à Greifswald (Allemagne), a quitté le CEA le 9 septembre 2009. Cette 70<sup>e</sup> bobine rejoint ses congénères en cours d'assemblage sur la machine, après les tests en conditions cryogéniques effectués par le CEA.

## NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE

2009 a été marquée par la loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, intégrant la lutte contre le changement climatique placée au premier rang des priorités et la confirmation de l'engagement pris par la France de diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050.

# Le CEA au rendez-vous du Grenelle de l'environnement



© P. Dumas/CEA

Sérisographie d'une cellule photovoltaïque sur la plate-forme Restaura.

Réduire le recours aux énergies fossiles en diversifiant les sources d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre dans le domaine des transports et la consommation d'énergie des bâtiments sont les grands objectifs sur lesquels le CEA a orienté son action. Pour répondre à ces objectifs et permettre d'industrialiser la production, conformément à la demande du Président de la République, le CEA a mis en place des plates-formes technologiques. Par ailleurs, pour atteindre rapidement la taille critique de moyens et de compétences, une nouvelle organisation a été mise en place en 2009, en structurant autour de l'institut Liten la très grande majorité des activités technologiques du CEA.

### Énergie solaire et efficacité énergétique

#### Des hétérojonctions au top mondial

Le bilan 2009 de l'activité se mesure d'abord à un pourcentage : 19,6 %. C'est le rendement de conversion obtenu sur les cellules photovoltaïques à hétérojonction de format industriel (12,5 x 12,5 mm) avec l'extension de la capacité de la plate-forme Restaura (Ines\* Chambéry). Le transfert industriel devrait être réalisé avec la construction d'un LabFab Hétérojonction, unité pilote en partenariat avec un industriel.

#### Centrales solaires : la prédiction à 24 heures

Avec une erreur moyenne de 6,2 % et de 8,6 % pour les deux sites étudiés pendant six mois (Cadarache et Chambéry), l'outil de prévision de production photovoltaïque de l'institut Liten a obtenu des résultats meilleurs que l'état de l'art. Cet outil fournit des prévisions de production à 24 heures avec un pas demi-horaire, conforme aux règles du Réseau de transport d'électricité français et permet au gestionnaire de réseau de compenser en grande partie le caractère intermittent et relativement aléatoire de la production photovoltaïque.



© F. Avavian/CEA

Banc d'ensoleillement pour tester la performance des capteurs solaires thermiques.

**Le banc d'ensoleillement artificiel bon pour le service**

Le banc d'ensoleillement artificiel installé fin 2008 à l'Ines a fait l'objet d'essais de validation concluants réalisés sur un capteur commercialisé testé par plusieurs laboratoires européens accrédités pour la certification. Ce banc permet de tester tous types de capteurs solaires thermiques dans des conditions proches d'un ensoleillement réel, sans subir d'aléas climatiques susceptibles de fausser le protocole retenu et positionne l'Ines parmi les laboratoires européens les mieux outillés dans ce domaine.

**Livraison des maisons Inca**

L'Ines dispose désormais sur sa plate-forme Inca de deux maisons expérimentales de 95 m<sup>2</sup>, qui sont autant d'outils de recherche grandeur nature, sur l'approche globale de l'efficacité énergétique des bâtiments. Toutes deux sont pourvues de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques et équipées de près de 300 capteurs de température, d'humidité, de vitesse d'air, de luminosité, de pression ou de consommation d'énergie. La présence humaine est simulée par des résistances électriques et des systèmes de production de vapeur d'eau.

**Transport innovant électrique**

**La chasse au platine continue**

Les travaux sur la réduction de la charge en platine des piles à combustible se sont poursuivis avec l'établissement d'un premier standard de durabilité sur des composants. Un assemblage membrane électrode (AME) composé d'une « anode Liten » à 0,2 mg de platine par cm<sup>2</sup> et d'une cathode



© CEA

Voilier équipé d'une pile à combustible pour moteur auxiliaire.

commerciale de référence a été testée pendant 1 000 heures en cycles représentatifs de l'application transport avec, au terme de cet essai, une baisse de la tension à fort courant de 10 % acceptable à ce stade du développement.

**La Méditerranée à la voile avec zéro CO<sub>2</sub>**

Un voilier de 12 m, dont la chaîne de traction électrique conçue et réalisée par l'institut Liten est composée d'un moteur auxiliaire électrique alimenté par une pile à combustible de 35 kW, a été présenté en décembre au Salon nautique de Paris. Il va naviguer en Méditerranée pendant 10 mois. L'équipage, constitué de scientifiques, collectera des données sur les pollutions en mer tout en adoptant lui-même des pratiques et comportements écologiques.

**307 électrique : moins d'un kilogramme d'hydrogène aux 100 km !**

Une 307 cabriolet a été équipée de batteries lithium-ion et d'un groupe électrogène à pile à combustible, basée sur la technologie Genepac du Liten intégrant des améliorations sur les AME. Le véhicule, testé et caractérisé sur circuit en fonctionnement hydrogène, a présenté des performances au meilleur niveau mondial : vitesse maximale de 155 km/h, 38 secondes au 1 000 m départ arrêté, autonomie sur batterie de 75 kg et de 400 km avec la pile et consommation d'hydrogène, à 995 g aux 100 km.

**Sûreté hydrogène : un niveau de risque inférieur ou égal aux filières énergétiques actuelles**

Avec l'ambition d'être un centre de compétence reconnu internationalement dans le domaine de la sûreté hydrogène, une démarche basée sur le couplage simulation-expérimental a été entreprise. La mise en place de l'installation et la réalisation d'une série d'expériences de rejet d'hélium en milieu confiné ont permis de caractériser les régimes possibles de stratification et de conforter les débits de perméation admissibles pour les réservoirs d'hydrogène.



© P. Stroppa/CEA

Test sur un réservoir d'hydrogène.

## NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE

### L'oxyde de titane bientôt produit à l'échelle du kilogramme

Le procédé de synthèse d'un oxyde de titane pour électrodes d'accumulateur Li-ion a été mis au point à l'échelle du kilogramme, pour préparer les nombreux projets de mobilité électrique de l'institut Liten. Le procédé initial, qui comptait six étapes, a donné naissance à un procédé en deux étapes compatible avec un développement industriel. L'oxyde de titane ainsi obtenu permet des charges/décharges rapides et multiples et combine des performances en puissance avec une densité énergétique élevée. Un premier transfert a été effectué au bénéfice de la société Prayon.

### Prollion démarre son activité

Créée par l'institut Liten avec le groupe Alcen, la start-up Prollion fabrique « à façon » des cellules électrochimiques de batteries Li-ion de 50 à 100 Ah et des packs batteries intégrant un système de gestion. Prollion est hébergée au sein de l'institut Liten à Grenoble, sur la plate-forme technologique Steeve, unique en Europe, où sont réalisées les batteries depuis la synthèse des matériaux jusqu'au montage dans un véhicule.

### Une usine de batteries électriques en France en 2012

À la mi-2012, l'usine Renault-Nissan de Flins, près de Paris, devrait commencer à produire en grande série des batteries Li-ion pour véhicules électriques. Ce projet qui représentera un investissement de 600 millions d'euros a été lancé début novembre 2009 avec la signature, entre



Mise en service d'une salle anhydre pour la fabrication de batteries lithium.

l'alliance Renault-Nissan, le CEA et le Fonds stratégique d'investissement, d'une lettre d'intention sur la création d'une joint-venture de développement et de production.

### Les biocarburants de 2<sup>e</sup> génération

#### L'Ademe donne son feu vert au projet BioTFuel

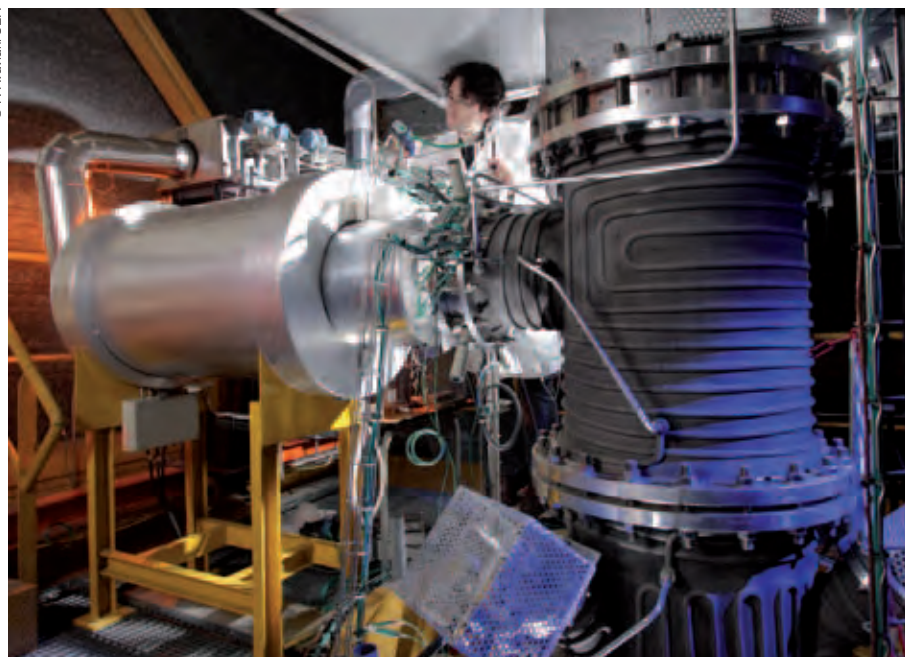
Le projet BioTFuel est un projet de recherche qui vise à mettre au point un procédé nou-

veau permettant notamment d'utiliser des charges variables en biomasse et résidus pétroliers et utilisant la technologie de préparation de la biomasse par torréfaction pour la synthèse de biocarburants de deuxième génération (diesel ou kérosène). Au sein du CEA, les équipes de l'Institut Liten auront en charge des travaux relevant de deux des trois plates-formes de BioTFuel : torréfaction et gazéification.

Elles apportent leur compétence dans le développement de technologies spécifiques (torréfaction, production d'oxygène), l'expertise sur la corrosion des matériaux (liée aux impuretés de la biomasse) et le développement de l'instrumentation. Le CEA est partenaire de ce projet aux côtés de l'Institut français du pétrole (IFP), Total, Sofiprotéol (établissement financier de la filière française des huiles et protéines végétales, Prolea) et Uhde GmbH (filiale du groupe industriel allemand ThyssenKrupp).

#### Lancement du projet Bure-Saudron

Le CEA et ses partenaires industriels et financiers lancent la première phase de finalisation des études du projet de construction d'un démonstrateur BTL – Biomass to Liquid – de production de biocarburants de 2<sup>e</sup> génération sur le site de Bure-Saudron. Ce projet s'appuie sur les atouts de ce territoire, localisé à la limite des départements de la Haute-Marne et de la Meuse, et reçoit le soutien des acteurs économiques et politiques locaux, notamment les conseils généraux et le conseil régional. L'objectif est de démontrer la faisabilité technique et économique d'une chaîne complète de production BTL en France, depuis la collecte de la biomasse jusqu'à la synthèse de carburant. L'introduction d'hydrogène dans



Installation Pegase destinée à réaliser la purification thermique du biogaz (craquage des goudrons et du méthane).

le procédé thermochimique pour optimiser le rendement massique constituera une première mondiale.

## Nanomatériaux pour l'énergie

### Matériaux thermoélectriques massifs : des rendements en forte hausse

Des rendements de conversion thermoélectrique de 9 % ( $ZT = 1,45$  à température ambiante) ont été mesurés sur des matériaux massifs nanostructurés, élaborés à partir de poudres par frittage Spark Plasma Sintering. Si les performances en rendement restent inférieures à celles des films minces qui atteignent des  $ZT$  de 2,4 à l'ambiante, seuls les matériaux massifs nanostructurés permettent de générer de la puissance électrique pour des flux thermiques inférieurs à  $100 \text{ W/cm}^2$ , ce qui est requis pour certaines applications comme le refroidissement de moteurs automobiles.

### Microbatteries lithium : prêtes pour la mise en boîtier 5 x 5

La collaboration avec STMicroelectronics Tours sur les microbatteries lithium a franchi une nouvelle étape. Ce laboratoire commun réalise des microbatteries à base d'électrode positive en  $\text{TiOS}$  sur substrat silicium 200 mm, résistantes au profil thermique d'une soudure à vague et dimensionnées pour une mise en boîtier LGA 5 x 5 mm. Les cycles charge-décharge ont mis en évidence des performances électriques conformes aux objectifs, en particulier une capacité supérieure à  $3 \mu\text{Ah}$ .

### Un outil performant pour surveiller les ambiances de travail

L'institut Liten a mis au point une technique de surveillance de l'atmosphère vis-à-vis des nanoparticules, 100 fois plus sensible que les méthodes existantes. Basée sur une analyse chimique des nanoparticules collectées, elle se prête à un usage opérationnel en milieu industriel. La technique comprend un préleveur sur filtre (nanobadge) assez compact pour être porté à la poitrine, doté d'une micropompe d'aspi-



Vue d'artiste de l'installation à Bure.



Boîte à gants dédiée aux études de nanosécurité – projet Nanosafe2.

ration et de batteries d'alimentation Li-ion. L'analyse élémentaire des nanoparticules collectées est effectuée par fluorescence X à réflexion totale, sans traitement préalable du filtre. Les limites de détection mesurées sont de l'ordre de  $35 \text{ ng}$  d'oxyde de titane par filtre, soit environ 1 000 particules de  $30 \text{ nm}$  de diamètre/ml d'air et permettent de s'abstraire du bruit de fond des nanoparticules naturelles, évalué à  $10 \text{ 000}$  particules/ml d'air.

## Les bioénergies

### Étudier le vivant et s'en inspirer pour de nouvelles sources d'énergie

Fort de son expertise en matière de recherche fondamentale sur la photosynthèse et les hydrogénases et de savoir-faire plus appliqués, notamment dans la conception de catalyseurs, le CEA mène des recherches sur les bioénergies. L'enjeu est de mettre au point des carburants de 3<sup>e</sup> génération. Pour cela, deux grandes voies sont suivies par les scientifiques du CEA. Il s'agit, d'une part, de tirer partie du vivant pour faire émerger des molécules à forte teneur énergétique (hydrogène, lipides...) et, d'autre part, de développer des stratégies de production biomimétiques pour la production d'hydrogène.

### Bioénergie : conception d'une hydrogénase résistante à l'oxygène

Un travail conjoint de chercheurs du CEA et du CNRS a permis de montrer que la modification par génie génétique d'une hydro-

génase bactérienne permettait de diminuer considérablement sa sensibilité à l'oxygène. Les hydrogénases sont des enzymes utilisées par certains micro-organismes photosynthétiques (microalgues ou cyanobactéries) pour produire de l'hydrogène à partir d'eau et d'énergie solaire. Leur utilisation dans des procédés de production industrielle est envisagée mais nécessite de s'affranchir de leur forte sensibilité à l'oxygène dégagé par la photosynthèse. Ce résultat ouvre donc des perspectives pour entreprendre la modification d'enzymes d'organismes photosynthétiques et ainsi améliorer leurs performances en termes de production d'hydrogène (*Journal of the American Chemical Society* [2009]).



Production d'hydrogène sous irradiation lumineuse par un photocatalyseur inorganique.