

Acteur majeur de la dissuasion nucléaire et de la sécurité nationale et internationale, le CEA a pour mission de concevoir, fabriquer, maintenir en condition opérationnelle, puis démanteler les têtes nucléaires qui équipent les forces océaniques et aéroportées. L'année 2009 a été marquée par le succès de la mise en service opérationnelle le 1^{er} octobre à Istres de la TNA, première tête nucléaire garantie par la simulation depuis l'arrêt définitif des essais nucléaires en 1996. Le nouvel enjeu du programme Simulation est maintenant de garantir la nouvelle tête océanique TNO, au travers de standards de calcul validés.

Le CEA est chargé de la conception et de l'entretien des réacteurs nucléaires assurant la propulsion des bâtiments de la Marine nationale, sous-marins et porte-avions. La construction du réacteur à terre RES qui sert d'appui pour tous les programmes de la propulsion nucléaire progresse. Le CEA est également responsable de l'approvisionnement des matières nucléaires pour les besoins de la Défense, dans le respect des décisions prises par la France d'arrêter la production de matières fissiles destinées aux armes et de démanteler les usines de production. La fin de l'année 2009 a été marquée par la mise à l'arrêt définitif des réacteurs Célestin.

Dans un monde en profonde mutation, le CEA permet à la France de conserver une dissuasion pérenne et crédible, après l'arrêt des essais nucléaires. De façon plus large, il contribue aux enjeux globaux de sécurité au travers de l'appui technique qu'il apporte aux autorités nationales, européennes et internationales pour les questions de désarmement, de lutte contre la prolifération nucléaire et le terrorisme.



Inspection d'un miroir en verre sur le laser Mégajoule.



Recherche
de base

© CEA



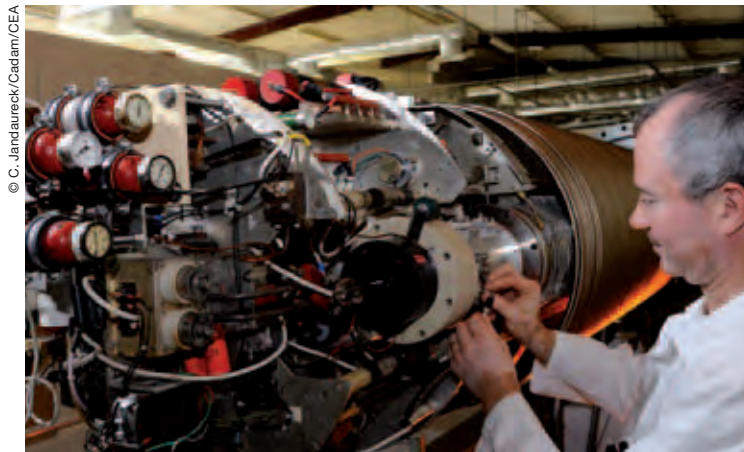
Centre de Gramat.

Défense

et sécurité globale

Le pôle Défense du CEA est responsable des recherches de base liées à ses principales missions, notamment dans les domaines des armes nucléaires (science des explosifs, comportement des matériaux sous forte sollicitation dynamique, neutronique, physique nucléaire, physique des plasmas et hydrodynamique radiative, lasers de puissance...), de la propulsion nucléaire (neutronique, vieillissement des matériaux sous irradiation), de la surveillance des traités (sismique, infrasons, transport des radionucléides) et de la lutte contre la prolifération et le terrorisme (capteurs).

Armes nucléaires, propulsion nucléaire, lutte contre la prolifération et le terrorisme : des recherches très actives



© C. Jandaureck/Cadram/CEA

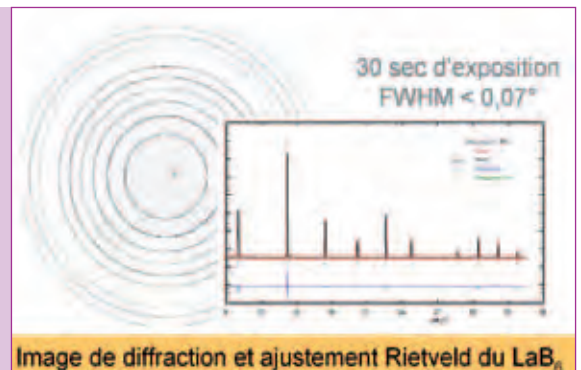
Les accélérateurs de particules sont exploités pour les recherches en physique nucléaire.

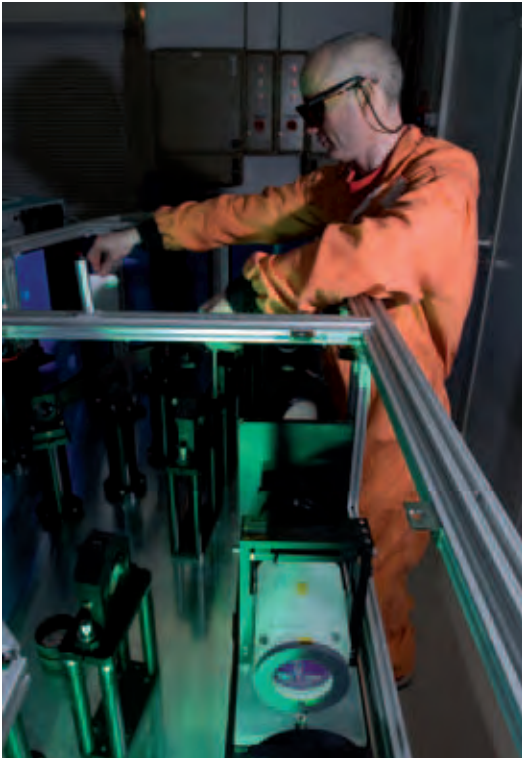
Physique nucléaire

L'année 2009 a notamment été marquée par une amélioration de la paramétrisation de l'interaction effective de la force de Gogny, utilisée depuis plus de 30 ans au CEA pour calculer les propriétés structurales des noyaux atomiques. Une expérience-test a été réalisée à l'aide de faisceaux d'ions lourds au laboratoire GSI de Darmstadt. Des détecteurs à scintillations très rapides ont permis de mesurer pour la première fois, simultanément, l'énergie cinétique des fragments avec une grande précision. Ce test constitue une étape importante pour les futures expériences sur la fission nucléaire auprès des installations du GSI (projets SOPHIA et ELISE). Ces éléments de base pour les études de fission contribuent à l'amélioration des modèles utilisés dans le cadre du programme Simulation.

PREMIÈRES EXPÉRIENCES SUR MARS

Une première expérience sur plutonium sur la ligne de lumière Mars du synchrotron Soleil, à Saclay, a été réalisée. Cette démonstration a permis d'obtenir des images de diffraction d'une très grande qualité et une première mesure d'absorption du plutonium. Elle illustre le potentiel de cette ligne pour caractériser la matière radioactive soumise à des conditions extrêmes de pression et de température.





Laser Yag utilisé pour mesurer la vitesse à l'intérieur de la matière.

Autour des lasers

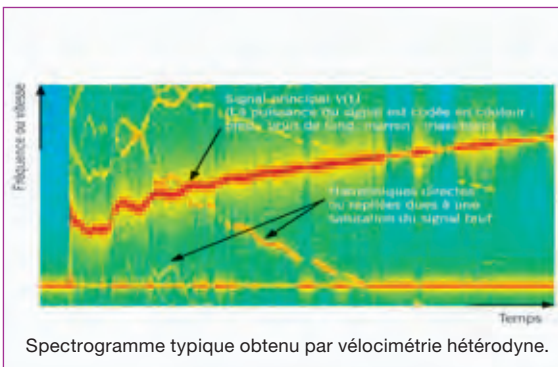
L'élément central des cibles destinées à obtenir la fusion sur le laser Mégajoule (LMJ) est un microballon de taille millimétrique, à géométrie et état de surface contrôlés. Pour mesurer les microdéfauts de surface, les comptabiliser et les cartographier, une technique de caractérisation optique a été retenue. Il s'agit d'un microscope holographique digital, couplé à des axes de rotation motorisés, pour lequel un système d'exploitation a été développé. Celui-ci dénombre les défauts et leurs caractéristiques en couvrant plus de 99,8 % de la surface totale du microballon.

Une campagne d'expérimentation dédiée à l'implosion en attaque indirecte a été réalisée sur le laser Omega de l'université de Rochester (États-Unis), en collaboration avec le Lawrence Livermore National Laboratory et le Massachusetts Institute of Technology. Elle a permis de démontrer l'avantage énergétique significatif offert par la filière de cavité de forme optimisée, dite « rugby », proposée pour le LMJ. Il s'agit d'atteindre des rendements neutroniques jamais obtenus en attaque indirecte pour la fusion de deutérium non cryogénique et de réaliser la première image neutronique dans cette configuration.

* NRBC-E : nucléaire, radiologique, biologique, chimique et explosif.

Procédés et matériaux innovants

Les travaux menés dans le cadre du programme interministériel de R&D NRBC-E* ont démontré l'intérêt du développement d'un dispositif multicapteurs pour la détection de traces d'explosifs. Ce nouveau concept présente un double avantage : un temps d'alerte en regard de la menace de l'ordre de la dizaine de secondes et la caractérisation de la menace dans la minute qui suit.



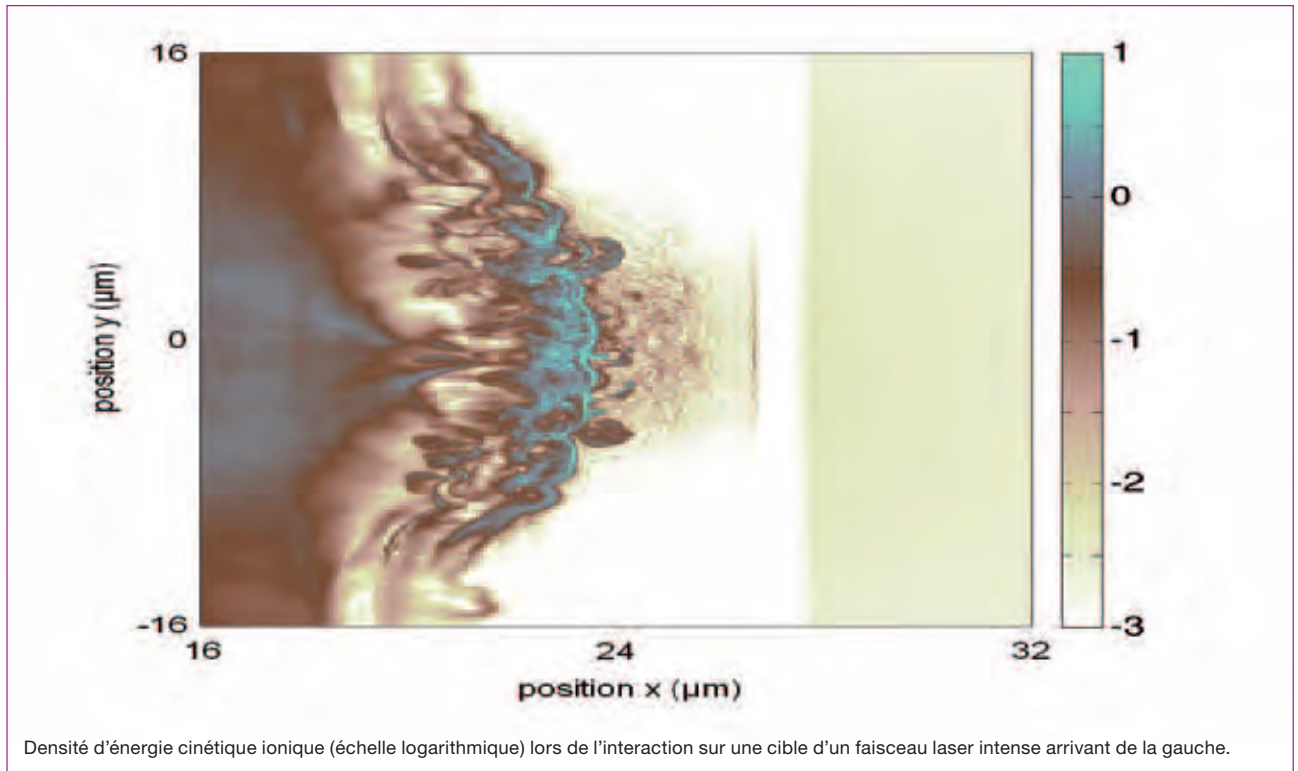
PROCÉDÉS INNOVANTS ET MATÉRIAUX NOUVEAUX



Le principe de vélocimétrie hétérodyne a été testé lors d'une expérience réalisée au Polygone d'expérimentations de Moronvilliers. Dans les études de détonique, cela permet de mesurer la vitesse à la surface d'un matériau soumis à un choc intense. Plus performant que les autres systèmes, ce concept a permis de miniaturiser les dispositifs de mesures et d'accroître le nombre de voies dans un même édifice. Ce type de mesure constitue un saut technologique dans l'expérimentation grande vitesse, indispensable pour la simulation.

Défense

et sécurité globale



Densité d'énergie cinétique ionique (échelle logarithmique) lors de l'interaction sur une cible d'un faisceau laser intense arrivant de la gauche.

Calcul haute performance

Parmi les résultats remarquables de l'année 2009, on peut citer la simulation cinétique de l'interaction laser-plasma. Ce calcul, réalisé au CCRT, a permis la simulation en 3D de la production d'un faisceau

de protons énergétiques par interaction entre un faisceau laser et une cible. Ce type de simulation est indispensable pour mettre au point les applications médicales envisagées avec ces faisceaux de protons.

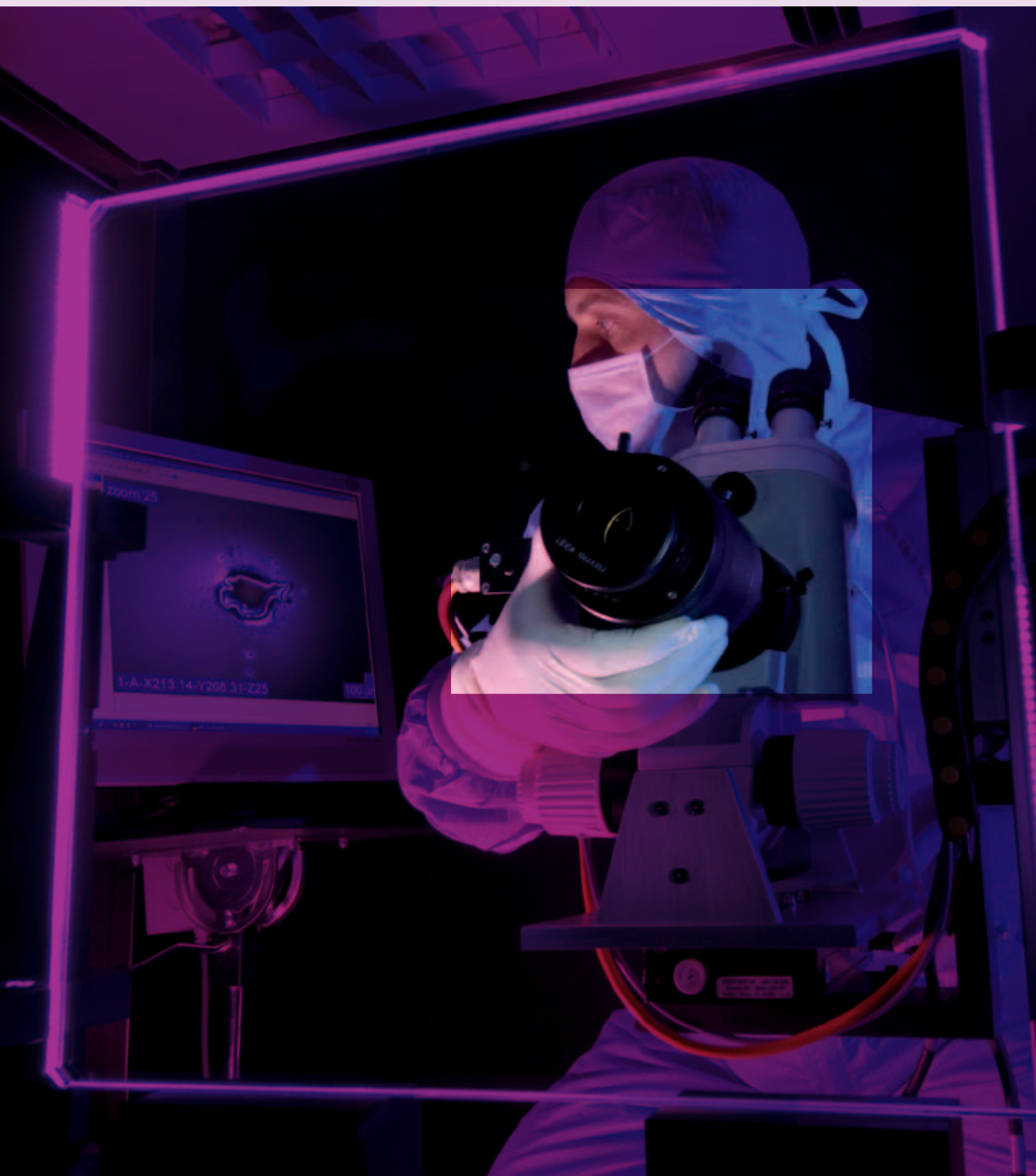
© CEA



GÉNÉRATEUR DE VAPEUR À PLAQUES



Le développement d'un générateur de vapeur à plaques, pour les futures chaufferies de la propulsion navale, a démarré. Il a fait l'objet d'une définition en partenariat avec Areva TA. Les éléments destinés aux premiers essais permettant de valider le fonctionnement thermique ont été réalisés. Le calendrier des essais doit permettre à la Défense de prendre une décision en 2013 quant à son installation sur le réacteur RES pour une phase de qualification en vraie grandeur. Le développement de ce composant permettra d'accroître la puissance et la durée de vie des cœurs de chaufferies intégrées de propulsion navale et d'en augmenter la compacité.

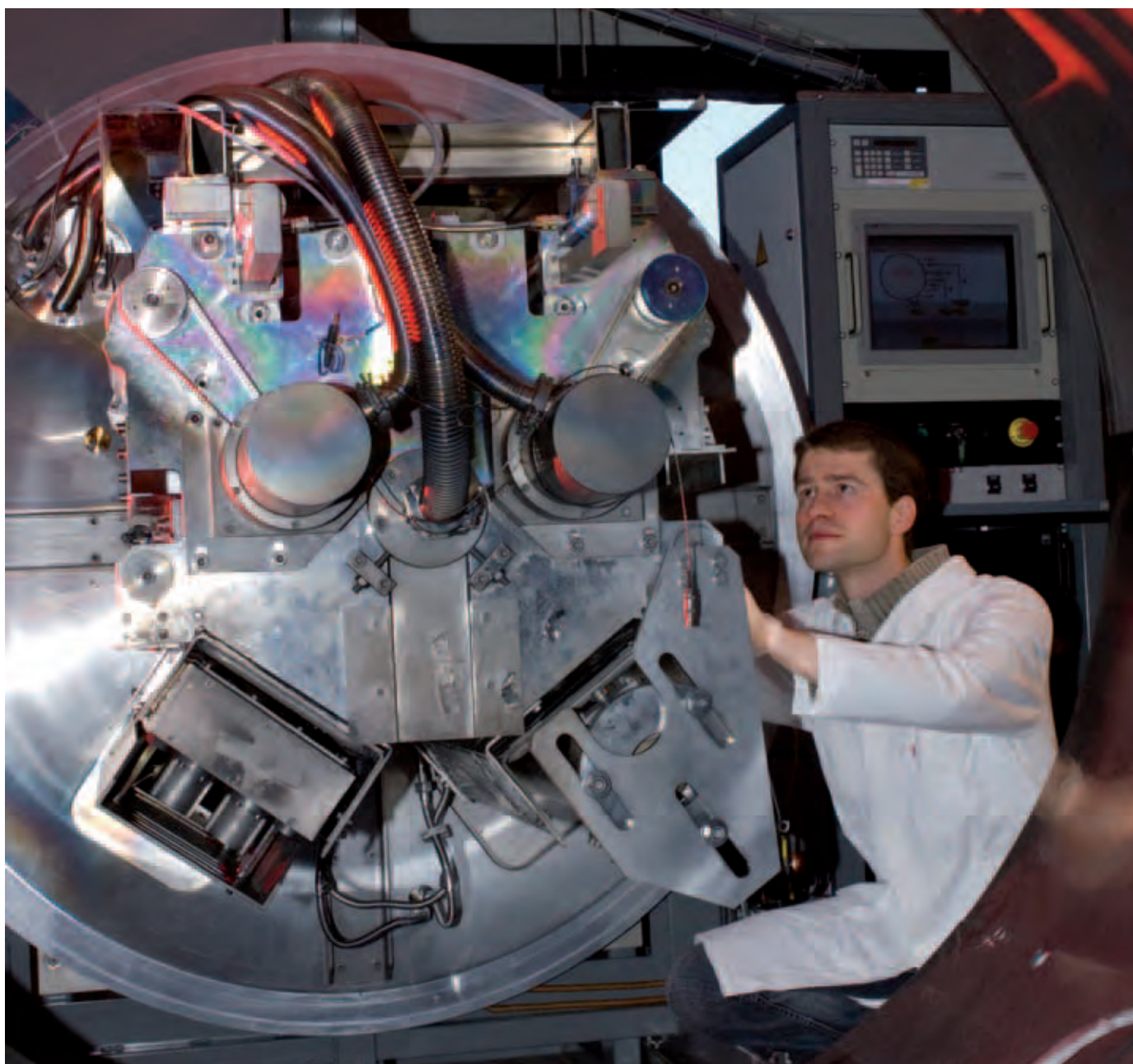


Défense

et sécurité globale

Acteur majeur de la dissuasion nucléaire et de la sécurité nationale et internationale

© C. Jandaureck/Cadarm/CEA



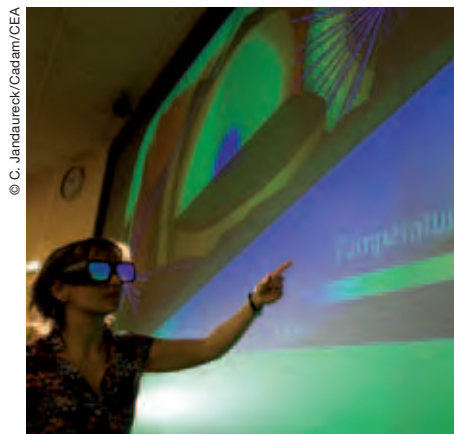
Développement et fabrication de composites, polymères, céramiques... indispensables pour constituer l'enveloppe de la tête nucléaire.

Les têtes nucléaires

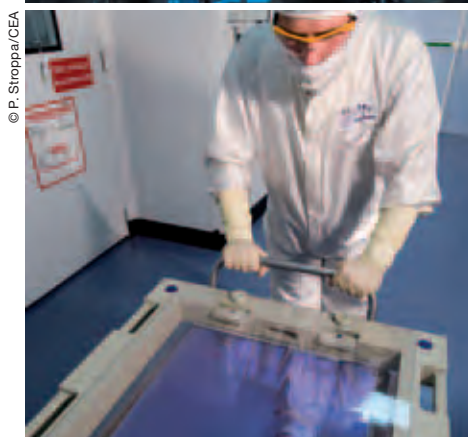
Fait marquant de l'année pour le pôle Défense : les premières TNA (têtes nucléaires aéroportées) opérationnelles ont été livrées à la Défense en 2009. La TNA, qui va remplacer la TN81, est la première arme nucléaire garantie par la simulation.

Elle équipe les missiles ASMPA depuis octobre 2009. Un essai en vol dans le cadre du programme ASMPA/TNA s'est déroulé avec succès en mars 2009. Ce jalon était dédié à la validation du fonctionnement global, en environnement opérationnel, d'une tête expérimentale inerte instrumentée, représentative de la charge réelle.

La maintenance des têtes nucléaires actuellement en service – TN81 pour la composante aéroportée et TN75 pour la composante océanique – se poursuit conformément aux échéances prévues. Corrélativement à la mise en service opérationnelle de la TNA, les premières TN81 ont été retirées du service et leur démontage a débuté.



Mur d'images haute résolution de l'installation Tera 10.



La TN75 va être remplacée par la tête nucléaire océanique (TNO), qui équipera les missiles stratégiques M51 à partir de 2015. Le dossier de lancement en développement du projet TNO a été transmis à la Défense fin 2009 et approuvé début 2010. La garantie du fonctionnement et des performances de cette nouvelle charge robuste s'appuiera sur les avancées les plus récentes de la simulation.

Le programme Simulation

Les têtes nucléaires, qui prennent progressivement la relève des armes en service lorsqu'elles arrivent en fin de vie, doivent être garanties sans nouveaux essais nucléaires. Le programme Simulation, lancé en 1996 pour répondre à cet objectif, a été élaboré autour de trois volets :

- le concept des charges robustes, fondé sur un fonctionnement peu sensible aux variations technologiques et testé lors de l'ultime campagne d'essais en 1995-1996 ;
- la validation des écarts dus à la « militarisation » de la charge nucléaire ou susceptibles d'apparaître au cours de la vie opérationnelle de l'arme ;
- la certification de nouvelles équipes chargées de garantir l'efficacité et la sûreté des armes.

Le programme Simulation repose sur de grands équipements : supercalculateurs, laser Mégajoule (LMJ) et grands moyens de caractérisation.

L'un des outils essentiels est une chaîne de logiciels qui permet de reproduire, par le calcul, les différentes phases de fonctionnement d'une arme nucléaire. Sa mise en œuvre nécessite la mise au point de modèles physiques détaillés et le déploiement de puissants moyens de calculs.

Le supercalculateur Tera 10 de Bull est actuellement une des machines les plus performantes d'Europe, avec une puissance crête de 60 téraflops (1 téraflops = mille milliards d'opérations par seconde). Le démonstrateur Tera 100 a été livré en juin 2009, conformément au contrat signé avec Bull en juillet 2008. Il permet de valider

les nouvelles technologies nécessaires au fonctionnement d'un ordinateur petaflopique. La seconde phase du contrat permettra l'acquisition et la mise en œuvre du supercalculateur, premier ordinateur petaflopique jamais conçu et réalisé en Europe. Le standard de calculs 2010 a été défini en 2009 et sera livré en 2010. Exploité sur la machine Tera 100, il constituera un élément clé dans le cadre du processus de garantie du fonctionnement et des performances de la charge nucléaire de la TNO.

La garantie de fonctionnement et de sûreté des armes impose une validation des simulations, obtenue en utilisant les résultats des essais nucléaires passés et les moyens expérimentaux que sont Airix, le laser Mégajoule et son prototype, la Ligne d'intégration laser (LIL).

La machine de radiographie Airix, installée sur le Polygone d'expérimentation

de Moronvilliers (PEM) en Champagne-Ardenne, permet de valider les modèles relatifs au début du fonctionnement de l'arme, dans sa phase non nucléaire.

Le LMJ, indispensable pour simuler le fonctionnement nucléaire de l'arme, est en cours de construction au Cesta, près de Bordeaux. Les opérations de montage des infrastructures de la Section amplificatrice hors amplificateurs (SAHA) se poursuivent dans les quatre halls. Le hall numéro 1 est entièrement monté (cinq chaînes SAHA, soit 40 faisceaux); l'équipement du hall numéro 2 a débuté. Le plancher équatorial du hall d'expérience a été monté.

Les campagnes d'expériences se poursuivent sur la LIL, pour les besoins de la physique des armes et pour ceux de l'atteinte de l'ignition sur le LMJ. Les miroirs déformables de fond de cavité de nouvelle génération ont été réalisés et installés. Grâce à

De gauche à droite : unité de stockage de Tera 10 – poste de pilotage Airix – procédé sol-gel pour les optiques du laser Mégajoule – test sur banc d'un optique en verre après plusieurs tirs laser.

CRÉATION D'UN CENTRE D'ALERTE AUX TSUNAMIS



Le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire et le ministère de l'Intérieur, de l'Outre-mer et des Collectivités territoriales ont confié au CEA le développement et l'exploitation d'un centre d'alerte aux tsunamis pour l'Atlantique Nord-Est et la Méditerranée occidentale. La création de ce centre, basé à Bruyères-le-Châtel, va nécessiter le développement d'outils de traitement de données géophysiques dédiées et la mise en œuvre d'une permanence 24 heures/24. Il sera opérationnel fin 2011. La secrétaire d'État chargée de l'écologie s'y est rendue le 9 octobre 2009.

DÉFENSE ET SÉCURITÉ GLOBALE

un traitement sol-gel de haute qualité, leurs performances optomécaniques obtenues avant tir de puissance sont conformes aux spécifications, et le pilotage simultané des quatre miroirs a été validé sur la chaîne laser de la LIL.

Ouverture à la communauté scientifique des moyens du programme Simulation

LMJ et Route des lasers

Éléments clés du programme Simulation, les supercalculateurs, le LMJ et son prototype la LIL, sont des réalisations exceptionnelles tant par leurs caractéristiques techniques que par leurs performances. Celles-ci sont mises à la disposition de la communauté scientifique européenne, conformément à la politique approuvée par le ministère de la Défense en 2002.

Le bâtiment de l'Institut lasers et plasmas (ILP) a été inauguré en janvier 2009. Cet institut a pour vocation de stimuler, animer et coordonner les recherches dans le domaine des lasers de puissance et des plasmas. Sa principale mission est d'organiser l'ouverture des grandes installations laser du CEA à l'ensemble de la communauté scientifique.

La Route des lasers, qui se développe autour de la LIL et du LMJ, fait partie des 39 pôles de compétitivité qui ont atteint les objectifs de la politique nationale.

Les campagnes d'expériences de physique des plasmas se poursuivent sur la LIL. Des expériences d'interaction réalisées pour l'ILP ont été menées en février 2009, faisant suite à une première campagne menée en 2007 qui avait conduit à valider l'efficacité d'une mousse de faible densité pour lisser les faisceaux laser dans les premiers instants de l'impulsion. Dans cette deuxième série de tirs, des variations paramétriques ont été réalisées sur la densité de la mousse ainsi que sur le niveau de lissage longitudinal du laser et son énergie.

Moyens de calculs et Teratec

Mis en service en 2003, le Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) constitue, avec le supercalculateur Tera 10, le complexe de calcul scientifique du CEA. Implanté sur le centre DAM Île-de-France, à Bruyères-le-Châtel, il est aujourd'hui un des premiers centres de calculs européens. Il a vocation à satisfaire les besoins de ses nombreux partenaires (CEA, EDF, Snecma...) en matière de grandes simulations numériques (voir aussi pages 38-39).

Seize grands challenges scientifiques ont été réalisés à l'été 2009 sur le nouveau calculateur Bull Titane du CCRT. Trois d'entre eux ont utilisé la partition GPU (Graphics Processing Unit) de ce calculateur hybride et ont ainsi démontré le caractère opérationnel de ces technologies innovantes pour le calcul intensif. Le campus Teratec accueillera le laboratoire Bull/CEA-DAM Extreme Computing ainsi que le laboratoire Intel/CEA/Genci/UVSQ Exatex.

La propulsion nucléaire

Responsable des chaufferies nucléaires des bâtiments de la Marine nationale, le CEA a assuré tout au long de l'année sa mission de soutien à la flotte en service.

Cette flotte était composée en 2009 du porte-avions *Charles-de-Gaulle*, de six sous-marins nucléaires d'attaque (SNA) et de trois sous-marins nucléaires lanceurs d'engins de nouvelle génération (SNLE NG). L'année 2009 a été plus particulièrement marquée par la réalisation des opérations liées à l'Iper (indisponibilité pour entretien et réparation) du SNA *Perle*. Le CEA a suivi, par délégation de la Marine, tous les travaux concernant la chaufferie en élargissant ainsi son périmètre de responsabilité par rapport aux Iper réalisées précédemment. Cette intervention s'est accompagnée, pour le SNA, du remplacement par un cœur neuf, fabriqué à Cadarache, préalablement livré et équipé au printemps 2009 à Toulon. Ce rechargement permettra de fournir l'énergie nécessaire au navire pendant au moins 10 ans.

La réalisation du programme Barracuda (renouvellement des SNA de la chaîne Rubis), lancée fin 2006, se poursuit. La soudure des deux premiers tronçons de la coque du *Suffren* a démarré en juin. La tranche conditionnelle lançant la réalisation du deuxième sous-marin, le *Duguay-Trouin*, a été signée par les industriels également en juin. La revue de fin de phase de conception détaillée de la chaufferie s'est déroulée avec succès en novembre.

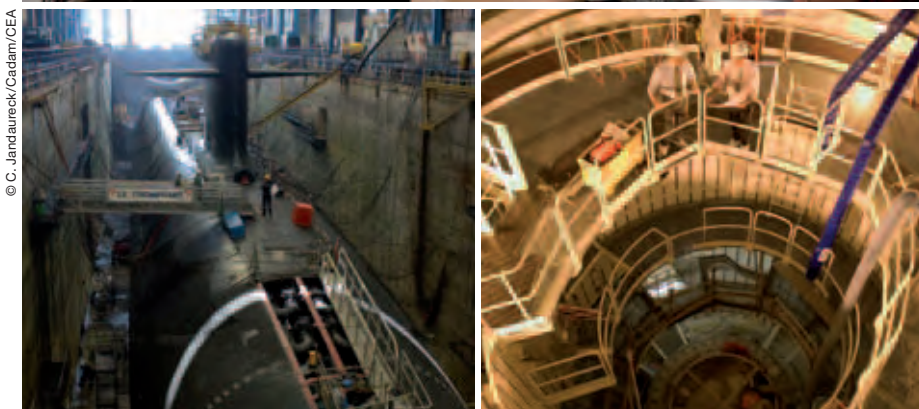
La réalisation des nouvelles installations d'essai à terre continue à Cadarache. Le programme RES (réacteur d'essai) comprend deux modules : une piscine d'entreposage et d'examen des combustibles, mise en service en 2005, et un réacteur équipé d'une instrumentation poussée.

L'année 2009 a vu la poursuite du chantier, notamment les opérations de montage (installations électriques, tuyauteries, ventilation...). Le générateur de vapeur a été transféré à Cadarache et sera posé sur la cuve mi-2010. Tous les composants principaux et capacités des circuits primaires et secondaires sont installés.

Une étude de faisabilité d'adaptation de la définition d'un second porte-avions à propulsion nucléaire a été lancée. Elle a pour objet d'apporter des éléments techniques, financiers et calendaires pour une éventuelle décision de réalisation en 2011-2012.

Assainissement des installations de la vallée du Rhône

Lancé en 1995, le programme de démantèlement et d'assainissement des installations de production de plutonium et d'uranium enrichi s'est poursuivi en 2009.



De g. à dr. : Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) – sous-marin nucléaire lanceur d'engins nouvelle génération (SNLE NG) *Le Triomphant* – au cœur de l'enceinte de confinement du réacteur RES en construction.

© P. Dumas/CEA



De g. à dr. : démantèlement d'une salle dans l'usine UP1 – la balise Dirad est un système de détection gamma automatisé, développé par le CEA dans le cadre de ses recherches NRBC.

Les opérations de mise à l'arrêt définitif de l'usine de retraitement UP1 de Marcoule ont continué. Conformément au calendrier, la démolition des bâtiments de commande des anciens réacteurs plutonigènes G2 et G3 s'est achevée en novembre 2009. Ces bâtiments étaient inactifs depuis 2006, date à laquelle le système de surveillance avait été transféré dans un nouveau poste de commande construit à proximité des bâtiments réacteurs. La phase ultime de démantèlement portera sur les blocs réacteurs encore en place ; elle démarrera en 2022, après l'ouverture par l'Andra du site de stockage de déchets de graphite.

Le programme Ardemu (arrêt et démantèlement des usines de Pierrelatte) a fait suite à l'arrêt définitif, en 1996, de la production d'uranium fortement enrichi pour les besoins de la Défense. Il concerne le démantèlement des quatre unités constituant l'usine d'enrichissement par diffusion gazeuse, dite « usine militaire », comprenant 4 192 diffuseurs et 9 millions de barrières de diffusion gazeuse. Un atelier spécifique, le « bâtiment diffuseurs », a été construit pour traiter les diffuseurs et les barrières. Après l'achèvement de la phase de dépose et de traitement de ces diffuseurs fin 2006, le démantèlement de tous les équipements annexes s'est poursuivi en 2009, et l'achèvement du programme à fin 2010 est confirmé.

Le démantèlement de ces installations est un des points forts de l'action de la France en faveur du désarmement nucléaire. Le Président



© C. Jandureck / CEA

de la République avait mis ce point en exergue lors de son discours de Cherbourg le 21 mars 2008, invitant la communauté internationale à venir constater le caractère irréversible de ce démantèlement. Deux nouvelles visites ont été organisées en 2009, au bénéfice d'experts et de journalistes internationaux.

Après 42 ans de fonctionnement, les réacteurs Célestin de Marcoule ont été mis à l'arrêt définitif le 23 décembre 2009. Ils seront assainis puis démantelés jusqu'au niveau 3 AIEA (hors génie civil).

Lutte contre la prolifération et le terrorisme, intervention nucléaire

En raison de ses capacités uniques dans le domaine nucléaire et civil, le CEA assure depuis de nombreuses années une mission d'appui technique auprès des autorités nationales pour les questions de dissuasion, désarmement et de lutte contre la prolifération nucléaire.

À ce titre, il est directement impliqué dans la surveillance du respect des grands traités (Traité de non-prolifération nucléaire, Traité d'interdiction complète des essais nucléaires). L'explosion détectée en Corée du Nord le 25 mai constitue un des faits marquants de 2009 : les moyens nationaux de cette surveillance ont permis d'annoncer très rapidement les caractéristiques de cette explosion.

Sur le plan technique, des actions importantes de remise à niveau des systèmes de surveillance ont été menées. Le déploiement de moyens de télécommunication de secours destinés à prévenir toute perte de transmission a été engagé. La première version industrielle du Système modulaire d'acquisition de données (Smad) a été déployée avec succès à Tahiti. Les actions de soutien à l'Otice (Organisation du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires) se sont poursuivies tout au long de l'année, avec notamment l'installation de la station de mesure du xénon FRX29 à la Réunion.

L'année a également été marquée par l'annonce de la création à Bruyères-le-Châtel d'un centre d'alerte aux tsunamis (cf. fait marquant). L'actualité internationale, très importante en matière de prolifération nucléaire, a nécessité de nombreuses contributions du CEA aux actions nationales dans ce domaine. Des progrès significatifs ont été réalisés dans les méthodes de détection et de caractérisation d'indices de prolifération nucléaire. Enfin, le CEA a poursuivi son soutien au Département des garanties de l'AIEA au travers du Programme français de soutien aux garanties.

Dans le cadre de sa mission au profit du ministère de la Défense, le CEA a participé à différents exercices d'intervention nucléaire, en particulier à un exercice national de sécurité nucléaire sur la base aérienne de Mont-de-Marsan en avril 2009. Tous ces exercices ont confirmé la qualité de son dispositif et sa bonne intégration dans l'Organisation nationale de crise de Défense (ONCD).

Des avancées significatives dans le cadre du programme interministériel de R&D confié au CEA dans le domaine de la lutte contre le terrorisme NRBC/E⁽¹⁾ ont été réalisées. Par exemple, un accord de licence a été signé avec la société Saphymo pour la balise Dirad développée par la Direction des applications militaires. Ce système automatisé de détection radiologique gamma permet l'identification en temps réel d'une anomalie radioactive et son interprétation en termes de niveaux de risques.

(1) NRBC/E : nucléaire, radiologique, biologique, chimique – explosifs.

© CEA



UN NOUVEAU CENTRE POUR LE CEA

Le centre d'études de Gramat de la Direction générale de l'armement (DGA) a rejoint le CEA le 1^{er} janvier 2010. L'administrateur général du CEA et le délégué général pour l'armement ont signé le 6 janvier 2010 la convention de transfert du centre. Fort de ses 250 salariés, Gramat développe la physique, l'expérimentation et le calcul numérique nécessaires à l'expertise en matière d'efficacité des armements et de protection des systèmes d'armes contre les agressions nucléaires et conventionnelles. Le rattachement de cette expertise au CEA permettra d'y constituer un pôle d'excellence en détonique et électromagnétisme.

