

# Des sciences fondamentales aux enjeux sociétaux : le rôle du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

Par la force des choses, de profondes mutations sont en cours dans nos modes de consommation et de production d'énergie. Les acteurs de R&D de ce domaine se doivent de répondre à ces nécessités par l'innovation technologique et de proposer des solutions énergétiques qui soient sûres, compétitives, économes en ressources naturelles et respectueuses de l'environnement.

Par **Daniel IRACANE\***, **Stanislas POMMERET\*\*** et **Elvire LEBLANC\*\*\***

**A**ux côtés d'autres organismes de recherche français, le CEA est depuis plus de soixante-cinq ans un instrument central de la politique française de recherche et développement scientifique et technologique. Son rôle est d'accroître la connaissance scientifique et de stimuler l'innovation et les transferts de technologies dans plusieurs domaines stratégiques et sociétaux majeurs au premier rang desquels se place l'énergie. Même si elles ont fortement évolué dans le temps, les nécessités d'ordre national et international, auxquelles le CEA contribue à répondre dans ces domaines restent à ce jour tout aussi pressantes (1).

---

\* Directeur adjoint de la direction des Relations internationales du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA).

\*\* Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA).

\*\*\* Responsable du domaine scientifique des Nouvelles Technologies pour l'Énergie, direction Stratégie et Programme du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA).

(1) Cette notion de nécessité dans le domaine de l'énergie structure l'action du CEA, conçu pour répondre aux « pressantes nécessités d'ordre national et international... pour que la France puisse tenir sa place dans le domaine des recherches concernant l'énergie atomique... », tel que le rappelle l'exposé des motifs de l'ordonnance du 18 octobre 1945 signée par le général De Gaulle et portant création du Commissariat à l'énergie atomique.

À l'heure où la Chine excelle dans le monde du calcul haute performance (elle possède les deuxième et quatrième machines les plus puissantes) (2), où l'Inde s'apprête à démarrer un réacteur à neutrons rapides d'une puissance de 500 MW électriques près de Chennai (anciennement Madras), marquant ainsi leur maîtrise des technologies de pointe, la France et l'Europe cherchent à maintenir leur *leadership* dans les domaines de la recherche et de l'innovation. Face aux puissances émergentes, notre atout majeur est notre capacité, fruit d'une longue culture, à coupler et à intégrer les résultats de la recherche fondamentale et ceux de la recherche technologique pour réaliser des démonstrateurs industriels. Ce couplage, illustré ci-dessous par quelques exemples, constitue le fil directeur de l'action du CEA.

La question de l'énergie est aujourd'hui critique dans nos sociétés, certes, mais elle relève aussi de notre responsabilité vis-à-vis des générations futures.

Cet article a pour objet de faire le point sur l'ensemble des énergies, sur leur devenir et leur complémentarité à l'horizon du milieu du XXI<sup>e</sup> siècle. Une profonde mutation de nos modes de consommation énergétique et la réduction de notre dépendance énergétique vis-à-vis des importations de combustibles fossiles ne nous paraissent possibles qu'à travers une approche associant le nucléaire, les énergies renouvelables, de nouveaux vecteurs d'énergie et des progrès significatifs en matière de stockage de l'énergie et de développement de réseaux intelligents. C'est sur ce programme de travail qu'œuvre le CEA.

Les deux articles précédents évoquent la capacité de l'énergie nucléaire de contribuer, à l'échelle du siècle, à la satisfaction de nos besoins énergétiques, d'une part, par le développement de réacteurs à neutrons rapides multipliant par cent le rendement de l'uranium naturel que nous extrayons du sous-sol (objet de l'article de François Gauché) et, d'autre part, par la recherche menée sur la fusion, qui ouvre une voie encore plus prometteuse et durable (objet de l'article de Jérôme Pamela et Sylvie André-Mitsialis).

## DES SCIENCES EN AMONT D'ENJEUX SOCIÉTAUX

Les progrès scientifiques en général et les sciences mobilisées sur les enjeux sociétaux s'alimentent les uns les autres, aussi bien sur le plan des outils et techniques utilisés que dans les réponses apportées aux grands enjeux de l'énergie, de la santé ou encore de la défense. Les exemples que nous allons évoquer illustrent, au travers des programmes de recherche du CEA, la manière dont un grand organisme de recherche tire parti de ces fertilisations croisées pour répondre aux grands enjeux sociétaux, et notamment à celui de l'énergie.

Au sein de multiples partenariats, le CEA apporte sa culture de la maîtrise de grands programmes et de

grands projets scientifiques et technologiques associant des équipes à la fois pluridisciplinaires et fortement intégrées.

## Science et énergie

Dans le domaine de la recherche fondamentale, cette culture permet au CEA de concevoir et de réaliser des instrumentations faisant appel à des technologies de très haut niveau. Les ingénieurs-chercheurs du CEA créent leurs instruments en poussant les technologies à leurs limites ultimes, en toute connaissance des besoins d'une science dont ils contribuent, avec d'autres grands organismes de recherche, à repousser les frontières. Cette dualité connaissance/instrumentation est une spécificité de la recherche fondamentale menée au CEA dans le domaine de la physique des particules comme dans celui de l'astrophysique. On peut évoquer à ce sujet la contribution majeure du CEA, en collaboration avec le CNRS, à la construction du *Large Hadron Collider* (LHC) et des détecteurs Atlas, CMS et Alice du Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN), à Genève.

Un des grands enjeux de la recherche fondamentale menée par le CEA est d'effectuer les recherches amont nécessaires aux développements des filières technologiques actuelles et des nouvelles sources d'énergie en prenant en compte, dès leur conception, des préoccupations sociétales, telles que leur impact sur le climat, sur la santé et sur l'environnement. De ce point de vue, le CEA, avec ses partenaires de l'Institut Pierre-Simon Laplace (CNRS, UPMC, UVSQ, CNES, IRD, ENS, Ecole Polytechnique,...) est un des acteurs majeurs des recherches menées sur le climat et l'environnement tant du point de vue scientifique que du point de vue sociétal. Le projet d'infrastructure ICOS (*Integrated Carbon Observation System*), qui est inscrit sur la liste ESFRI (*European Strategy Forum on Research Infrastructures*), sera un outil mis à la disposition des scientifiques et permettra de quantifier les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le cadre d'une politique européenne de suivi de celles-ci.

Les grandes infrastructures de recherche sont au point de convergence des technologies mises en œuvre pour développer les capacités d'investigation et de création de la communauté scientifique et, au-delà, de l'innovation, grâce à l'ouverture de ces très grands instruments de recherche (TGIR) aux industriels.

Outre la compréhension des mécanismes fondamentaux qu'elles apportent, ces installations permettent aussi de caractériser finement les matériaux utilisés dans les filières énergétiques (nucléaire, photovoltaïque, électrochimique, notamment). La découverte

(2) <http://top500.org/>, classement de novembre 2011.



Atlas



Atlas Higgs

Collision « candidate » pour signer la présence d'un boson de Higgs. (déTECTEUR ATLAS, décembre 2011)  
©ATLAS/CERN

### La découverte du boson de Higgs

À l'occasion d'un séminaire qui s'est tenu au CERN le 4 juillet 2012, en prélude à la grande conférence de physique des particules de l'année, ICHEP2012, les expériences ATLAS et CMS ont présenté leurs derniers résultats préliminaires concernant la recherche du boson de Higgs. Les deux expériences observent une nouvelle particule de masse voisine de 125 GeV. Il s'agit d'un boson dont les caractéristiques sont compatibles avec celles du boson de Higgs, bien que des analyses complémentaires soient nécessaires pour en établir la nature. Cette découverte représente une étape cruciale dans la compréhension des composants ultimes de la matière. Les résultats des deux expériences s'appuient sur l'analyse d'un volume de données environ deux fois supérieur à celui des résultats présentés en décembre 2011. « Nous avons franchi une nouvelle étape dans notre compréhension de la nature », a déclaré le directeur général du CERN, Rolf Heuer. Cette découverte ouvre un champ de recherche totalement nouveau car le boson de Higgs n'est ni une particule de matière ni un vecteur d'interaction, mais il est directement lié à la structure du vide et est à l'origine de la masse des particules élémentaires. Ce programme de recherche exige dans un premier temps bien davantage de données statistiques relatives au LHC à l'énergie actuelle, puis à l'énergie nominale du LHC à partir de 2014. En établissant les propriétés de cette nouvelle particule, on contribuera à lever le voile sur d'autres mystères de la physique, notamment celui de la matière noire de notre Univers. Les équipes du CNRS/IN2P3 et du CEA/Irfu ont joué un rôle de premier plan dans la construction du LHC et des expériences et dans la réalisation des analyses ayant conduit à cette découverte majeure.



ICOS

### ICOS : un futur réseau européen de suivi des sources et puits de gaz à effet de serre

Quatre observatoires atmosphériques ont entrepris en Europe une campagne de mesures afin de démontrer la faisabilité d'un réseau européen de suivi des puits et des sources de gaz à effet de serre. Soutenu en France par le CEA, le CNRS, l'UVSQ et l'Andra, le futur réseau atmosphérique ICOS (*Integrated carbon observing system*) est appelé à devenir une infrastructure de recherche en environnement dédiée à l'observation à haute résolution des échanges de carbone (dioxyde de carbone, méthane et autres gaz à effet de serre) entre la surface terrestre, la surface des océans et l'atmosphère. Il rassemblera plus de quarante laboratoires de recherche de tout premier plan d'une vingtaine de pays.

de nouveaux matériaux susceptibles de révolutionner le monde de l'énergie sera inspirée par notre connaissance de leurs structures et de leurs dynamiques aux niveaux moléculaire et atomique.

Ainsi, le CEA œuvre à donner une compréhension fine des matériaux utiles aux énergies d'avenir sur des échelles de temps et d'espace allant de la structure moléculaire aux cellules énergétiques, et de la picose-

conde aux phénomènes liés au vieillissement. À cette fin sont mobilisées, à proximité immédiate du CEA Grenoble et avec l'implication forte de celui-ci, les deux installations majeures à l'échelle internationale que sont le réacteur HFR (*High Flux Reactor*) de l'Institut Laue Langevin (ILL) et le synchrotron ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*). En effet, les neutrons et les photons X sont des sondes irrempla-

çables pour explorer l'organisation micro et mésoscopique de la matière. Ces laboratoires internationalement reconnus dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies, alliés à des moyens d'investigation associés (comme la plateforme de nano-caractérisation PFNC) et soutenus par le CEA, le CNRS, l'Institut National Polytechnique de Grenoble et l'Université Joseph Fourier, offrent un environnement scientifique et technologique propice à l'innovation énergétique. L'interaction entre ces partenaires, déjà formalisée dans le cadre de l'initiative Grands Instruments pour les Matériaux pour l'Energie (GIME), est renforcée *via* des accords bilatéraux avec l'Institut Laue-Langevin (ILL) et l'*European Synchrotron Radiation Facility* (ESRF) sur les thématiques afférentes à l'énergie.

La science des matériaux utilisés dans le domaine des énergies nucléaires est complexe. Dans les réacteurs nucléaires électrogènes d'aujourd'hui, les aciers utilisés dans les parties internes du cœur sont extrêmement sollicités : chaque atome subit en moyenne deux déplacements par an sous l'effet de l'impact des neutrons émis par le cœur. Le développement des futurs réacteurs nucléaires à neutrons rapides, et plus encore celui des réacteurs de fusion, nécessite des matériaux résistant à une sollicitation dix fois plus intense.

Plusieurs décennies de progrès ont permis de développer une physique du vieillissement des matériaux soumis à l'irradiation. Aujourd'hui, la simulation, adossée à l'expérience, permet d'appréhender les mécanismes en jeu. Cet enjeu est au cœur de la performance de la production d'énergie nucléaire, de par son impact direct sur la durée de vie des installations et, surtout, sur leur sûreté. Le CEA maintient en cette matière des compétences et des installations correspondant au meilleur état de l'art au niveau international. Cette science repose tout d'abord sur des réacteurs de recherche qui ont été à la base du développement de l'énergie nucléaire. Le réacteur OSIRIS, qui est en fonctionnement à Saclay depuis les années 1960, sera remplacé par le réacteur RJH, en cours de construction à Cadarache afin d'offrir un outil moderne permettant aux futurs ingénieurs et chercheurs de continuer à expérimenter dans les conditions les plus performantes les matériaux nécessaires à la production d'énergie nucléaire.

Si ces réacteurs de recherche permettent de mener des expériences en matière de qualification des matériaux, il convient de les compléter par des outils permettant une approche plus fondamentale. Ainsi, sur le réacteur ORPHEE, le Laboratoire Léon Brillouin participe aux développements de matériaux hétérogènes très prometteurs, les aciers à dispersion d'oxyde. Le synchrotron SOLEIL (inauguré en 2006) permet la caractérisation de matériaux grâce à ses puissantes sources de lumière ; dès sa conception, il a été prévu de pouvoir étudier des matériaux radioactifs, ce qui nécessite de disposer de moyens de protection adap-

tés, tels que permettra d'en réaliser la ligne expérimentale MARS (*Multi Analyses on Radioactive Samples*) en vue d'étudier des combustibles irradiés. La ligne METROLOGIE (ouverte en 2008) est accessible à l'ensemble de la communauté scientifique concernée par l'instrumentation laser X et XUV. Enfin, en couplant plusieurs accélérateurs d'ions, le CEA et le CNRS ont réalisé la plateforme expérimentale JANNUS, qui, de par son caractère très innovant, va permettre de progresser dans la compréhension des mécanismes d'endommagement des matériaux soumis à l'irradiation.

Dans le domaine des bioénergies, l'étude des mécanismes fondamentaux de la photosynthèse et du métabolisme de micro-algues ouvre des voies prometteuses pour la production de biocarburants de troisième génération. En 2011, le CEA a obtenu de premiers résultats portant sur l'un des processus moléculaires responsables de la dynamique des réserves carbonées dans une micro-algue photosynthétique (3).

La production d'hydrogène à partir d'une décomposition (bio-inspirée) de l'eau par voie photocatalytique nécessite l'élaboration de systèmes qui soient capables de capter la lumière et de la transformer en flux d'électrons, qui à leur tour vont oxyder l'eau et réduire en hydrogène les protons résultant de cette oxydation (4). En 2011, les chercheurs du CEA ont effectivement mis au point un photocatalyseur permettant l'oxydation de l'eau ainsi qu'une photocathode permettant la production d'hydrogène à partir des protons qu'elle génère (5).

## Science et vivant

Les technologies médicales doivent beaucoup aux développements réalisés dans d'autres domaines scientifiques (technologies de l'information, matériaux, instrumentations physiques, chimie et biochimie,...) et cette tendance doit encore s'amplifier pour arriver à mieux comprendre le fonctionnement du vivant et mieux prendre en charge les pathologies humaines (cancers, maladies génétiques, maladies neuro-dégénératives, affections cardio-vasculaires,...).

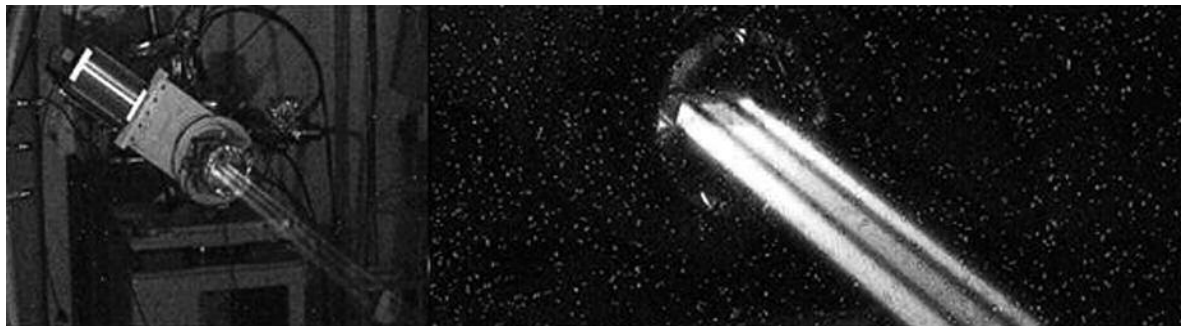
(3) SIAUT (M.), CUINE (S.), CAGNON (C.), FESSLER (B.), NGUYEN (M.), CARRIER (P.), BEYLY (A.), BEISSON (F.), TRIANTAPHYLIDES (C.), LI-BEISSON (Y.) & PELTIER (G.), *BMC Biotechnol.*, 11(1) :7, 2011.

(4) LE GOFF (A.), ARTERO (V.), JOUSSELME (B.), DINH (P. T.), GUILLET (N.), METAYE (R.), FIGHI (A.), PALACIN (S.) & FONTECAVE (M.), *Science*, 326, pp. 1384-1387, 2009.

(5) TRAN (P. D.), LE GOFF (A.), HEIDKAMP (J.), JOUSSELME (B.), GUILLET (N.), PALACIN (S.), DAU (H.), FONTECAVE (M.) & ARTERO (V.), *Angew. Chem.*, 2011, 50, pp. 1371-1374.

## 5 février 2008 : ouverture de la ligne METROLOGIE sur le synchrotron SOLEIL

Cette ligne de lumière du synchrotron SOLEIL est équipée de plusieurs stations permettant de mesurer dans la plus grande partie du spectre couvert par le synchrotron les paramètres photométriques qui caractérisent des éléments optiques tels que la réflectivité des surfaces, l'efficacité de diffraction des réseaux, la diffusion des surfaces ou l'efficacité des détecteurs X et X-UV. Cette installation pourra servir également à développer des instruments et des diagnostics nécessaires à la caractérisation des faisceaux de rayons X (intensité, taille, degré de cohérence, polarisation, etc.). Le synchrotron SOLEIL est partenaire de PRISME, un réseau de mesure et de métrologie en région Île-de-France.



Ligne Métrologie



La plateforme de multi-irradiation JANNUS (Jumelage d'Accélérateurs pour les Nanosciences, le Nucléaire et la Simulation) se compose de deux dispositifs expérimentaux d'irradiation. L'un est situé à Orsay, au Centre de Spectrométrie de Masse et de Spectrométrie Nucléaire rattaché au CNRS/IN2P3 et à l'Université Paris Sud ; il couple un accélérateur de type tandem de 2 MV (ARAMIS), un implanteur d'ions de 190 kV (IRMA) et un microscope électronique à transmission de 200 kV. L'autre dispositif est installé au CEA Saclay. Il regroupe deux accélérateurs électrostatiques d'ions positifs, comme l'hélium et l'hydrogène, une machine de type Pelletron™ d'une différence de potentiel de 3 MV équipée d'une source d'ions multichargés (ECR à résonance cyclotronique électronique) et un Van de Graaff simple étage de 2,5 MV. À terme, un tandem de 2 MV viendra compléter ce dispositif.

De nombreux exemples en témoignent, dans les domaines de l'imagerie médicale, de la chirurgie assistée, du diagnostic ou encore de la biologie dite à grande échelle (génomique, protéomique, métabolomique).

En retour, cette connaissance des sciences du vivant est source d'inspiration pour la mise au point de solutions énergétiques innovantes.

Les recherches menées par le CEA dans ce domaine scientifique s'appuient sur sa capacité à rassembler un large ensemble de compétences issues des sciences du vivant (imagerie, techniques de marquage et d'analyse, ingénierie et structure des biomolécules, plateformes de génomique et de post-génomique) provenant de la recherche technologique (micro et nanotechnologies) ou encore de la chimie et de la physique (accélérateurs de particules, cryogénie et

détecteurs associés) pour développer les technologies pour les domaines de la santé, de l'environnement et des biotechnologies.

Elles visent aussi à évaluer l'impact sur l'homme et sur son environnement des activités en matière d'énergie nucléaire ou renouvelable, ou encore de certaines substances utilisées par les grands procédés industriels, ce qui nécessite, notamment, de caractériser aux différents niveaux d'organisation de la matière vivante les éléments de la réponse à l'exposition aux rayonnements, aux toxiques chimiques et aux nanoparticules.

Dans le domaine de l'imagerie médicale, le CEA apporte une réponse opérationnelle, par le biais de technologies clefs, aux grands enjeux de santé publique que sont les maladies neuro-dégénératives, le cancer, les pathologies cardiovasculaires ou les mala-

dies émergentes. Il a d'ores et déjà fait la preuve de son efficacité dans le domaine du diagnostic des neuropathies, de la vaccination ou de la biothérapie des désordres génétiques hématologiques.

Ces recherches s'articulent autour de quatre plateformes d'imagerie (SHFJ, NeuroSpin, MIRCen et Cycéron) uniques en France dans leur double mission de développement scientifique et technologique en imagerie médicale et d'offre de services à la communauté scientifique et médicale. Le CEA contribue à la structuration des actions autour des neurosciences et à la pérennisation de l'interaction fructueuse entre les communautés scientifiques de la physique et de la médecine, en particulier en réalisant dans le cadre du projet ISEULT un aimant de 11,7 Tesla destiné à l'examen IRM du corps humain en entier, ce qui sera une première mondiale. Ce projet qui est le fruit d'une coopération exemplaire entre les différentes composantes du CEA permet de mettre au service des préoccupations de santé du public des technologies qu'il a développées à d'autres fins.

### Science et Défense

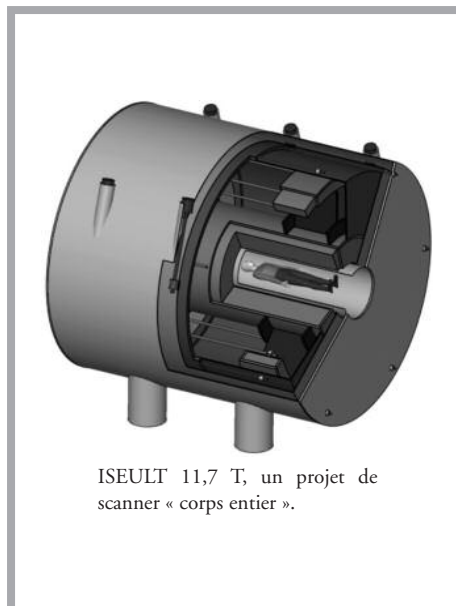
La signature du traité d'interdiction complète des essais nucléaires en 1996 et sa ratification par la France en 1998 ont profondément modifié l'approche du CEA pour assurer la pérennisation des outils de la dissuasion nucléaire française. Le lancement par la France et les Etats-Unis d'un programme de simulation du fonctionnement des armes nucléaires se traduit par un recours au calcul scientifique intensif et par le développement de nouvelles plateformes expérimentales destinées à collecter les données nécessaires

à leur modélisation, dont la plus impressionnante, de par sa taille et sa complexité, est le Laser Mégajoule. Les développements scientifiques et techniques pour la Défense nationale se basent sur les acquis du monde civil et, en poussant certaines technologies jusqu'à leurs limites, ils créent des opportunités dans le domaine des recherches dites duales (optique, électronique, matériaux, énergie, procédés manufacturiers,...).

### Lasers et fusion

La recherche sur l'obtention de la fusion thermonucléaire par confinement inertiel (FCI) a débuté dans les années 1960. Cette recherche était menée essentiellement par les organismes destinés à concevoir les armes nucléaires, que ce soit en France (au CEA), aux Etats-Unis et en URSS. Afin de mener à bien ces recherches, ces trois pays ont développé des lasers de très forte énergie afin de comprimer des billes contenant un mélange de deutérium et de tritium ( $^2\text{H}/^3\text{H}$ ) et d'initier ainsi un plasma dans des conditions de température et de pression aboutissant à la fusion nucléaire. En France, on peut citer deux installations qui ont contribué à cette recherche : le laser PHEBUS, dans les années 1990 (CEA), et le laser LULI2000 (CEA-CNRS-Ecole Polytechnique). Suite à l'annonce, au début des années 2000, de la construction de la NIF (*National Ignition Facility*) aux Etats-Unis, sur le site du Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), et du Laser Mégajoule (LMJ), en France, sur le site CESTA du CEA/DAM, la communauté FCI s'est structurée autour de deux pôles :

- un pôle, autour de la NIF, avec le projet LIFE (*Laser Inertial Fusion Energy*) ;



ISEULT 11,7 T, un projet de scanner « corps entier ».

Le centre de neuro-imagerie en champ intense NeuroSpin est une infrastructure de recherche majeure dédiée à l'étude tant des maladies neurologiques (Alzheimer) que des affections psychiatriques (dépression ou schizophrénie). Fort de compétences en physique et en technologie des grands accélérateurs, le CEA a construit une installation à la pointe de l'état de l'art visant prochainement le record d'une intensité magnétique de 11,7 teslas et exploitant la résonance magnétique nucléaire (RMN) pour fournir une imagerie du cerveau des plus précises.

L'imagerie neuro-fonctionnelle couple des informations anatomiques et des informations fonctionnelles pour mieux comprendre le fonctionnement du cerveau. NeuroSpin permettra de voir des amas de milliers de neurones (au lieu de millions de neurones aujourd'hui) avec une finesse d'un dixième de millimètre, à la cadence d'une image par dixième de seconde, ce qui représente une résolution spatiale et temporelle multipliée par dix, par rapport à celle des instruments actuels.



Photo 1 : LMJ Site



Photo 2 : LMJ Cible

- un second pôle, en Europe, avec le projet HiPER (*High Power Laser Energy Research Facility*) autour du LMJ et de sa composante PETAL (*Pétawatt Aquitaine Laser*).

À ces deux pôles qui fédèrent une recherche fondamentale civile autour de la FCI à partir d'instruments construits pour la garantie des armes nucléaires, il convient d'ajouter le pôle de recherche civile du Japon sur la FCI par allumage rapide à l'aide d'un laser pétawatt, au laboratoire ILE (à Osaka). Enfin, la Russie et la Chine projettent d'ouvrir des installations lasers de grandes dimensions pour la garantie de leurs armes nucléaires, et développer la recherche en matière d'applications dans le domaine civil.

### *La simulation*

L'arrêt des essais nucléaires a conduit le CEA à recourir, en ce qui concerne la France, aux méthodes de simulation pour la conception et la garantie de ces armes (énergie, sûreté).

Le CEA a concentré ses efforts sur les architectures massivement parallèles et, en partenariat avec l'entreprise Bull, il a œuvré dans un objectif d'indépendance de la France (et, au-delà, de l'Europe) dans le domaine du calcul intensif. Parallèlement aux déve-

loppements opérés dans le domaine de la Défense nationale, la France, en créant le GENCI (Grand Equipement National pour le Calcul Intensif), en 2007, a su stimuler l'introduction du calcul intensif dans le domaine civil et coordonner la mise en œuvre d'un plan stratégique d'équipement des trois centres nationaux de calcul intensif pour la recherche civile (l'IDRIS du CNRS, le CCRT du CEA et le CINES des universités).

De même, depuis 2007, la participation de la France au projet européen PRACE visant à équiper l'Europe de moyens de calcul du meilleur niveau mondial et l'installation, à Bruyères-le-Châtel, du supercalculateur Curie, ont permis à la France de se doter d'une puissance de calcul haute performance pétaflopique [Ndlr : à un million de milliards d'opérations à virgule flottante par seconde - *Floating-point Operations Per Second* (FLOPS)] et de figurer ainsi à trois reprises dans le Top 10 mondial en 2011.

Ces moyens de calcul sont aujourd'hui indispensables à la simulation de certains problèmes clés du domaine de l'énergie, tels que l'évolution des matériaux soumis à l'irradiation dans des conditions extrêmes (comme ceux utilisés dans le nucléaire), mais aussi pour mieux maîtriser les phénomènes liés au vieillissement (dans le domaine du photovoltaïque, notamment).

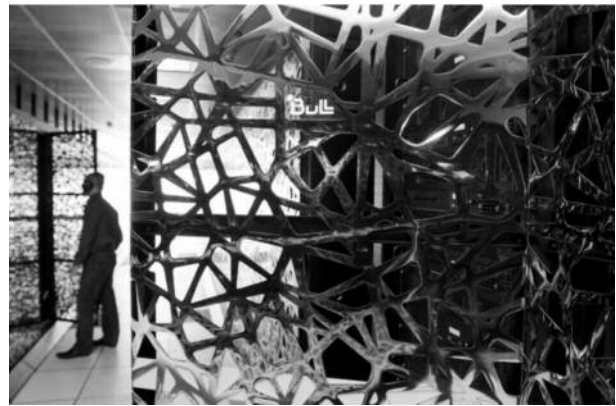


Photo 3 : TERA 100



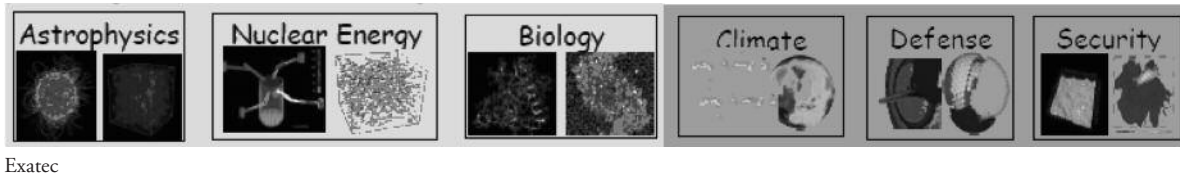
Photo 4 : TGCC Vue extérieur

L'apport des sciences aux questions sociétales que le CEA endosse est replacé dans le contexte de l'évolution de la problématique de l'énergie, que nous abordons dans la seconde partie de cet article.

**Ex@tec**

Le laboratoire commun Ex@tec, qui réunit le CEA, l'Université de Versailles Saint-Quentin, la société GENCI et INTEL, associe des développeurs de composants matériels et logiciels, des architectes et des utilisateurs, autour de l'objectif d'ouvrir la porte à la réalisation de machines d'une puissance exaflopique.

L'activité de ce laboratoire inclut l'exploration des défis liés à l'intégration de systèmes multi-pétaflopiques, l'optimisation des performances logicielles et une collaboration avec les développeurs et les utilisateurs de grands systèmes orientée vers l'optimisation des applications. L'énergie, la sismologie, la dynamique des fluides et la santé font partie des secteurs retenus pour cette collaboration. L'émergence de la classe Exascale (l'exaflops est mille fois plus puissant que le pétaflops) permettra la résolution de problèmes complexes, impossibles à traiter actuellement dans un laps de temps raisonnable. En santé, il deviendra possible de proposer un traitement individualisé à un patient grâce au calcul de son génome.

**L'AVENIR DES ÉNERGIES**

Le nucléaire, une réponse durable au besoin de disposer d'une énergie de base sans carbone

Aujourd'hui, la France présente la particularité de produire son énergie électrique (puissance moyenne annuelle de 60 GW) avec des émissions de gaz à effet de serre (GES) très limitées, grâce à l'apport largement majoritaire du nucléaire (~ 78 %) et à l'apport complémentaire des sources d'énergie renouvelable : hydraulique, éolien, ... (~ 12 %). Les énergies fossiles (~ 10 %) n'interviennent que pendant les périodes de pointe (la puissance instantanée demandée pouvant aller jusqu'à 105 GW). L'adaptation de l'offre à la demande sur le réseau électrique français se fait essentiellement *via* l'hydraulique et les énergies fossiles, y compris grâce aux interconnexions avec nos voisins. Le choix du nucléaire a été assumé en France par l'opinion publique et par les différents gouvernements successifs au vu des avantages que notre pays et chacun de ses habitants pouvaient en retirer en termes de coût et de disponibilité et des moyens mis en place pour prévenir les accidents et en maîtriser les risques. Sans cette source d'énergie, force est de constater que nous devrions importer plus de 92 % de notre consommation primaire d'énergie. Même avec le nucléaire, nous sommes encore dépendants à hauteur de 50 % des importations de pétrole et de gaz dont les coûts ne peuvent aller que croissants (triplement en six ans) ; grâce aux choix opérés par le pays, nous bénéficions d'un prix du kWh inférieur d'environ 40 % à la moyenne de celui constaté chez nos voisins européens, tout en émettant un tiers en moins de gaz à effet de serre.

Dans le contexte d'une demande mondiale d'énergie croissante dans laquelle le pétrole, le gaz et le charbon représentent encore aujourd'hui 80 % de la consommation mondiale en énergie primaire malgré leur coût de plus en plus élevé, nous devons diminuer notre dépendance vis-à-vis des pays exportateurs en raison de l'épuisement progressif des réserves mondiales et de la nécessaire limitation des émissions de gaz à effet de serre qui sont associées aux combustibles fossiles. Dans le mix énergétique du XXI<sup>e</sup> siècle, le nucléaire peut contribuer durablement à la satisfaction d'une part des besoins en énergie de l'humanité, les innovations en cours de développement (avec les réacteurs à neutrons rapides notamment) garantissant une sécurité d'approvisionnement à l'échelle pluriséculaire. Si l'Allemagne a décidé de cesser de faire appel à un horizon rapproché à l'énergie nucléaire, de nombreux autres pays confirment leur décision de garder une composante nucléaire dans leur mix énergétique, avec des critères de sûreté de plus en plus exigeants. En effet, des standards de sûreté de plus en plus élevés, aussi bien au plan de la conception des installations et des choix de sites que sur celui de la robustesse de la chaîne opérationnelle et décisionnelle, sont, à juste titre, comme l'a illustré l'accident de Fukushima, la condition *sine qua non* de l'acceptation par l'opinion mondiale d'un développement de l'énergie nucléaire. Près d'un an après le grave accident de Fukushima, les décideurs publics, les acteurs du nucléaire et les citoyens sont sensibles à ses conséquences et, dans un débat désormais mondialisé, ils en retirent des enseignements techniques (comme le montre notre encart consacré aux évaluations complémentaires en matière de sûreté et de politique énergétique).

L'utilisation durable de l'énergie nucléaire nécessite la confiance de la population dans la robustesse des dispositifs de sûreté mis en œuvre. La sûreté nucléaire



### Les évaluations complémentaires de sûreté, après Fukushima

En réaction aux événements de Fukushima, le Premier ministre français, M. François Fillon, demandait, le 23 mars 2011, une inspection de toutes les centrales nucléaires françaises afin de s'assurer que celles-ci étaient préparées à demeurer sûres y compris face à des événements naturels extrêmes des plus improbables.

Dans le même temps, le Conseil de l'Union européenne déclarait que « la sûreté de toutes les centrales nucléaires de l'Union européenne devrait être réexaminée sur la base d'une évaluation globale et transparente des risques (*stress tests*) ».

Pour apporter une réponse à la demande du Conseil dans les meilleurs délais, les experts de l'ENSREG (*European Nuclear Safety Regulators' Group*) ont travaillé (en associant la Commission européenne) de manière intensive, en tirant pleinement parti des compétences disponibles, notamment de celles de l'association WENRA (*Western European Nuclear Regulators' Association*), pour déterminer la définition technique de ces tests dans une approche homogène à l'échelle de l'Europe.

L'accord définitif du 25 mai 2011 entre les autorités nationales de sûreté nucléaire des pays membres de l'Union européenne et la Commission européenne sur le cahier des charges des « tests de résistance » de ces centrales a fixé les grandes étapes du processus.

Ces tests, qui consistent en une réévaluation ciblée des marges de sûreté des centrales nucléaires à la lumière des événements qui ont frappé le Japon, concernent trois thèmes : les agressions naturelles externes, la perte des fonctions de sûreté (source froide, électricité) et la gestion d'un accident sévère.

Enfin, le 31 décembre 2011, chaque État membre concerné remettait son rapport national définitif au Conseil européen.

L'étape actuelle, qui a débuté le 15 janvier 2011 et qui s'achèvera en juin 2012, consiste en une « revue par les pairs » des rapports nationaux définitifs.

En France, dans le cadre de ces procédures, l'ASN a, dès le 5 mai 2011, demandé aux exploitants français d'engager des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) qui soient cohérentes avec le cahier des charges européen approuvé par l'ENSREG. La France a mené ces tests sur l'ensemble de ses installations : 58 réacteurs en exploitation, 1 réacteur en construction et 21 autres installations jugées prioritaires. Outre les inspecteurs de l'ASN et les experts de l'IRSN, 47 experts étrangers ont participé aux inspections dans notre pays, à Chooz, à Gravelines, à Cattenom et à Fessenheim.

Le 3 janvier 2012, l'ASN rendait public son rapport final d'analyse des ECS (6) en le remettant au Premier ministre, indiquant que si des travaux complémentaires ou des organisations nouvelles étaient recommandées, rien ne justifiait l'arrêt définitif d'une seule installation nucléaire en France.

repose sur une conception robuste des installations désormais soumises, au plan technique, à une réévaluation pour une meilleure prise en compte de l'occurrence simultanée d'événements naturels même hautement improbables. Elle repose aussi sur une organisation adaptée avec des personnels bien formés, entraînés et préparés pour faire face aux situations de crises les plus aiguës. Le partage de l'information et le débat avec le public sont également des composantes clés.

Partout dans le monde, la sûreté nucléaire connaît un « après-Fukushima ». Les contrôles de sûreté réalisés par une autorité indépendante des enjeux économiques autant que les recherches pour renforcer la sûreté conditionnent son avenir. Les États exploitant l'énergie nucléaire progressent vers une concertation renforcée afin de réaliser une harmonisation des standards de sûreté de leurs installations. À cette fin, la pratique de revues de sûreté à l'échelle régionale pourrait être renforcée, par la présence de membres d'autorités de sûreté nucléaires étrangères et d'experts internationaux.

### Les nouvelles technologies de l'énergie pour une sortie du « tout-pétrole »

Pour nous permettre d'atteindre les objectifs dit des « *trois fois vingt* » du paquet climat de l'Union européenne (- 20 % d'émission de GES, une amélioration de 20 % de l'efficacité énergétique par rapport à 1990 et une contribution à hauteur de 20 % des énergies renouvelables aux mix énergétiques), le CEA mène des recherches suivant les trois axes d'une stratégie intégrée : la production durable d'énergie sans émission de gaz à effet de serre, avec les énergies nucléaire, solaire et marine, les technologies de stockage de l'énergie électrique et thermique et de fonctionnement optimisé du réseau (*via* l'hydrogène et les piles à combustible, les batteries, les biocarburants et l'intelligence des réseaux) et l'efficacité énergétique avec

(6) <http://www.asn.fr/index.php/S-informer/Publications/Rapports-d-expertise/Evaluations-complementaires-de-surete/Rapport-de-l-ASN-sur-les-evaluations-complementaires-de-surete-ECS>

l'optimisation des modes de consommation (bâtiments, transports, technologies de l'information et de la communication).

Les énergies renouvelables solaire, éolienne, marine et géothermique connectées à des réseaux de distribution intelligents viendront compléter la production de base, d'énergie nucléaire. Le stockage de l'électricité par voie directe (grâce à des batteries), ou par voie indirecte (*via* l'hydrogène et les biocarburants de deuxième génération) permettra d'ajuster, à tout instant, l'offre à la demande.

Nous sommes convaincus du fort potentiel des nouvelles technologies de l'énergie, qui se positionneront à terme comme une alternative crédible aux énergies fossiles. Leur développement sur le marché national permettra de diminuer la dépendance de la France au pétrole et au gaz naturel tout en abaissant les émissions de gaz à effet de serre. Décentralisées et intermittentes, consommées près de leur lieu de production, les énergies renouvelables cohabiteront avec l'énergie nucléaire qui, grâce à ses caractéristiques (fonctionnement stable et prévisible sur de longues périodes, puissance), assurera une production régulière, dite de base, pouvant être transportée sur de longues distances. Ainsi, loin de voir dans les énergies renouvelables des concurrentes de l'énergie nucléaire, le CEA affiche leur montée en puissance comme un objectif majeur de complémentarité avantageuse pour tous.

Au niveau national, l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie (ANCRE), que le CEA a contribué à fonder avec le CNRS, la Conférence des Présidents d'Universités et l'IFP-Energies Nouvelles, incarne cette volonté commune qu'ont les acteurs de mener les recherches nécessaires à la construction d'un bouquet énergétique mieux adapté à l'évolution de nos besoins. Par-delà les engagements dit des *trois fois vingt* fixés dans le cadre de l'*European Energy Research Alliance* (EERA), que nous avons mentionnés plus haut, la France se mobilise autour de l'objectif de son indépendance énergétique quasi complète à l'horizon 2040-2050.

Pour les transports, la France reste très dépendante des énergies fossiles. Il reste donc à développer à grande échelle des technologies faisant appel à de nouvelles sources, de nouveaux vecteurs et de nouveaux moyens de stockage, ainsi qu'à une plus grande intelligence dans le couplage de ces techniques.

Le stockage d'énergie est primordial pour apporter de la flexibilité et de la fiabilité compte tenu de l'intégration de plus en plus grande de différentes énergies alternatives, qui, pour la plupart, sont intermittentes. Il concerne différentes gammes de puissance et de durées de restitution de l'énergie qu'il permet d'emmagasiner. Ce stockage ne peut se concevoir sans parler du vecteur de transport de l'énergie. On retrouve ici les différents vecteurs fossiles (pétrole, gaz et biocarburants) qui sont intrinsèquement stockables, mais aussi l'électricité, l'hydrogène, la chaleur ou le froid. La conversion d'énergie entre différents vecteurs (chaleur, électricité, hydrogène, hydrocarbures de synthèse,...) est essentielle pour adapter l'énergie produite aux différents besoins rencontrés (l'habitat, les transports, l'industrie, l'agriculture,...). C'est un élément de flexibilité indispensable pour optimiser l'utilisation des différents moyens de production et de stockage de l'énergie.

Le réseau électrique actuel n'est pas adapté aux évolutions à moyen terme des pratiques de consommation et de production énergétiques. Les chercheurs du CEA travaillent à la conception du réseau énergétique dit intelligent. Aujourd'hui très centralisé, le réseau électrique national dépend d'un nombre d'acteurs limité, on peut donc facilement anticiper son état et en assurer une relative stabilité. Demain, le réseau électrique sera composé de millions d'acteurs (consommateurs et producteurs) au comportement peu prévisible. Une optimisation fine de son fonctionnement ne sera possible qu'au prix d'un couplage important aux techniques de l'information. Bien sûr, la sûreté des systèmes d'information et de contrôle des systèmes énergétiques deviendra alors un enjeu majeur, dans ce nouveau contexte d'interdépendance

### L'efficacité énergétique des bâtiments

L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments est un enjeu majeur, en particulier pour réduire la dépendance énergétique de la France vis-à-vis de l'extérieur lors de périodes de froid ou de chaleur intenses. En partenariat avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), le CEA développe une plateforme logicielle ouverte aux différents acteurs du bâtiment, qui permettra de garantir l'efficacité énergétique à toutes les étapes : conception, construction, vie et démolition du bâtiment. Cette plateforme intégrera également une application pour le diagnostic thermique et la rénovation de bâtiments anciens au moindre coût.

Cette plateforme est située à Chambéry (Institut National de l'Énergie Solaire).

entre des réseaux de plus en plus complexes : électricité, communication et informatique ; cela constitue aussi un axe de recherche pour le CEA.

Comme nous l'avons mis en évidence dans la première partie de cet article, un des atouts du CEA est sa capacité à mobiliser en synergie des équipes de recherche fondamentale et des équipes de recherche technologique en vue d'un couplage amont/aval efficace nécessaire à l'introduction de véritables ruptures technologiques. Ses recherches sur les énergies renouvelables se développent grâce à la complémentarité entre les domaines d'expertise des différents pôles du CEA et en étroite adéquation avec la demande des industriels. Cela lui permet de développer des technologies innovantes adaptées à un domaine industriel dans lequel il existe de fortes contraintes (en matière de coûts, d'approvisionnement en matériaux, d'environnements d'utilisation, de capacités industrielles). À titre d'illustration, nous développons trois exemples de ces recherches, dans les encadrés ci-après.

## CONCLUSION

La maîtrise de grands projets de recherche explorant les frontières de la connaissance et ses applications aux enjeux sociétaux, avec un positionnement équilibré entre recherche fondamentale et innovation, est la marque du CEA. Elle lui permet d'être performant, dans la durée, en tant qu'acteur majeur de la recherche technologique mondiale (7).

Cela est tout particulièrement vrai dans le domaine de l'énergie, où le CEA a développé une stratégie de recherche intégrée, autour du nucléaire et des énergies renouvelables, de l'adaptation entre l'offre et la demande d'énergie et des nouvelles applications de l'électricité aux transports et au bâtiment, dans une logique d'économie des ressources et d'efficacité énergétique.

(7) En 2011, le CEA a déposé 655 brevets. Il est le premier organisme public de recherche à être précédé uniquement par des industriels dans le classement mondial des brevets PCT (*Patent Common Treaty*).

### L'énergie solaire

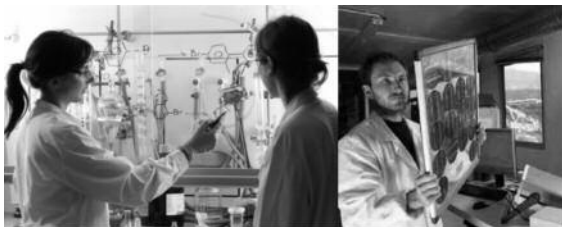
La stratégie retenue par le CEA dans le domaine du photovoltaïque et du solaire thermique à concentration consiste à favoriser l'innovation dans ces deux domaines autour des matériaux et de leur intégration dans des composants et/ou systèmes, et par des plateformes technologiques et/ou des démonstrateurs.

- Matériaux innovants. Le CEA s'appuie sur ses recherches fondamentales dans le domaine des nanotechnologies et des nanosciences pour dépasser les limites actuelles des cellules photovoltaïques et atteindre des rendements de 30 % et plus.

- Composants « cœurs » et systèmes associés. Le CEA tire profit des résultats de sa recherche amont pour l'élaboration de composants innovants. Ceux-ci seront intégrés dans des systèmes électriques complets, grâce à un partenariat très fort avec les acteurs industriels (EDF-PV-Alliance, Clipsol, Giordano,...).

- Les plateformes technologiques et les démonstrateurs. En réponse directe aux recommandations du Grenelle de l'Environnement, l'INES permet d'intégrer l'innovation au cœur des procédés industriels afin d'accélérer le transfert industriel.

Un des exemples au niveau des matériaux de l'apport de la recherche fondamentale à l'amélioration des procédés industriels est le procédé PHOTOSIL, qui est basé sur le silicium métallurgique. Cette technologie mise au point par le CEA à partir d'une innovation issue du SIMaP (CNRS/INP) a permis d'obtenir des cellules solaires à partir de silicium métallurgique à plus de 16 % de rendement, un résultat qui le situe au meilleur niveau mondial.



cea



### La plateforme de R&D Solaire et de stockage de l'énergie MYRTE

Le 9 janvier 2012, le CEA, le CNRS, l'Université de Corse et la société HELION ont inauguré à Ajaccio, au Centre de Recherches scientifiques Georges Peri, la plateforme de recherche et développement solaire et stockage de l'énergie MYRTE.

Cette plateforme a pour objectif d'expérimenter et de rendre possible l'intégration massive des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique de la Corse sur la base d'un couplage entre les énergies renouvelables et l'hydrogène.

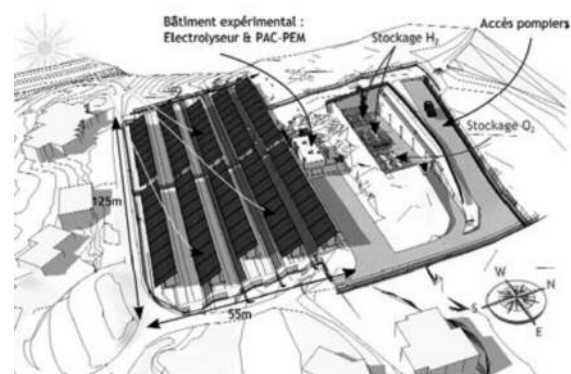
Comment convertir l'énergie solaire, qui est soumise à des rendements aléatoires, en une source d'électricité disponible à tout moment ? Après cinq années de recherches, la plateforme MYRTE a vu le jour à Ajaccio. Elle est constituée d'une centrale photovoltaïque d'une puissance installée de 560 kilowatts crêtes couvrant 3 700 m<sup>2</sup> et reliée directement à une chaîne hydrogène utilisée comme moyen de stockage.

Le but de ce démonstrateur est de stocker l'énergie photovoltaïque *via* un électrolyseur qui convertit l'électricité en hydrogène et oxygène pendant les heures de faible consommation. Cette énergie est ensuite restituée *via* une pile à combustible qui, en recombinaison l'hydrogène et l'oxygène, produit de l'électricité qui est alors disponible sur le réseau pendant les heures de forte consommation, c'est-à-dire le soir, lorsque les panneaux photovoltaïques ne produisent plus d'électricité.

L'hydrogène ainsi produit, puis stocké, permet de gérer les fluctuations de la puissance des énergies renouvelables intermittentes injectées dans le réseau. Le CEA apporte ici son expertise scientifique au développement de la plateforme par des études scientifiques portant sur la production photovoltaïque et le stockage de l'hydrogène.



Myrte 1. et Myrte 2.



Myrte 3.

### Les biocarburants de deuxième génération : le projet SYNDIESE

SYNDIESE est un projet de plateforme intégrée de production de biocarburants de deuxième génération porté par le CEA faisant le lien entre la recherche amont et la pré-industrialisation. Les équipes de recherche du CEA apportent leur savoir-faire au développement de nouvelles méthodes susceptibles d'augmenter le rendement de la conversion de biomasse en hydrocarbures. Une amélioration du rendement de 30 %, grâce à l'ajout d'hydrogène dans le procédé a été démontrée en laboratoire. C'est une première mondiale. D'autre part, les chercheurs du CEA travailleront sur la maîtrise de l'intégration des différentes étapes technologiques pour de futurs procédés industriels. Le démonstrateur pré-industriel SYNDIESE, situé à Bure-Saudron (Haute-Marne), permettra ainsi l'optimisation économique du procédé et de la filière, afin de transformer une invention en une réalité industrielle.

La région de Bure-Saudron dispose d'une importante ressource forestière, que le projet SYNDIESE permettra de valoriser en accord avec les acteurs locaux. Le projet SYNDIESE consistera donc à utiliser des résidus de l'exploitation des forêts (les rémanents forestiers) pour fabriquer du biodiesel ou du bio-kérosène.

Cette usine prototype sera capable de produire annuellement 23 000 tonnes de biocarburant à partir de 75 000 tonnes de biomasse. Les technologies développées ici pourront à terme contribuer à l'indépendance énergétique nationale dans le domaine des transports (routier, aérien...) en se substituant à l'utilisation du pétrole.