

les défis du cea

166

DÉCEMBRE 2011 –
JANVIER 2012

ÉNERGIES
BAS CARBONE

Le magazine de la recherche et de ses applications



energie atomique • energies alternatives

SOMMAIRE // BIOCARBURANTS [P. 4] STOCKAGE DE L'ÉNERGIE [P. 12] EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE [P. 13] PRODUCTION D'HYDROGÈNE [P. 14] RECYCLAGE [P. 15] MODÉLISATION NUMÉRIQUE [P. 15] MIX ÉNERGÉTIQUE [PP. 16-17] L'INSTITUT INTERNATIONAL DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE : 3 QUESTIONS À MARIE-FRANÇOISE DEBREUILLE [P. 18]

: n° spécial

→ STRATÉGIE

EXPERTISES POUR LES ÉNERGIES DE DEMAIN [P. 61]

Sommaire N° 166

04 Retour sur l'actualité

BIOCARBURANTS // Héliobiotech carbure [4] **VÉHICULES ÉLECTRIQUES** // Une recharge et ça repart [4] **REVUE DE PRESSE** [5]



06 À la une STRATÉGIE // EXPERTISES POUR LES ÉNERGIES DE DEMAIN

11 À la pointe

PRODUCTION D'HYDROGÈNE // Une microalgue superproductive [12]
EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE // Refroidies pour éclairer plus longtemps [13]
STOCKAGE DE L'ÉNERGIE // Nouvelle architecture de batteries [14]
RECYCLAGE // Métamorphoses carboniques [15] **MODÉLISATION NUMÉRIQUE** // Un pilote virtuel dans le réacteur [15]

16 Tout s'explique

Mix énergétique.

18 Ils en parlent

MARIE-FRANÇOISE DUBREUILLE, Directrice de l'Institut international de l'énergie nucléaire, présente l'offre de formation française en la matière.

À voir sur www.cea.fr

Retrouvez sur le site du CEA l'actualité de ses laboratoires et de nombreux dossiers thématiques, en multimédia (texte, audio et vidéo) et pour tous les publics.

www.cea.fr/videos/dossiers

Tour du propriétaire



Premier poste de consommation énergétique en France, le secteur du bâtiment est un enjeu majeur pour la recherche. À l'Ines, les chercheurs du CEA valorisent l'énergie solaire pour l'habitat en développant de nouveaux concepts sur les trois maisons pilotes du projet Incas. Visite guidée dans ce reportage vidéo.

<http://le-fil-science.cea.fr/>

Record du monde

Rouler pendant vingt-quatre heures avec un véhicule électrique, en alternant conduite et recharge rapide avec un pack batterie non refroidi : voici la prouesse réalisée au CEA-Liten. Avec 1 280 km parcourus, la voiture AX ainsi équipée a détrôné le précédent record de 1 254 km obtenu par une équipe néerlandaise. Retour sur la course.

www.cea.fr/videos/experiences

Expériences pas à pas



Deux citrons, un clou en zinc, l'autre en cuivre, un réveil digital, une lime à ongle et du fil électrique. Ces simples ingrédients permettent de fabriquer une pile, à condition de suivre la recette en direct ! D'autres expériences sont également proposées pour réaliser un chauffe-eau solaire, mesurer la température, comprendre l'effet de serre...

Cap sur les énergies bas carbone

Avec ce numéro spécial, *Les Défis du CEA* assurent la transition de 2011 vers « 2012, Année internationale de l'énergie durable pour tous ». L'occasion de rappeler la stratégie du CEA pour apporter des solutions à cet enjeu sociétal majeur. Au sommaire : les expertises et technologies développées sur les énergies bas carbone (nucléaire, solaire, biomasse, hydrogène) pour trois domaines applicatifs (transport, bâtiment, réseaux), tout en considérant les problématiques de stockage de

l'énergie et d'efficacité énergétique. Ces briques technologiques seront détaillées tout au long de l'année, notamment au sein de la rubrique « À la une », exclusivement consacrée aux dernières innovations en simulation numérique pour le nucléaire, solaire à concentration thermique, stockage de l'énergie, bâtiment à énergie positive, nucléaire de 4^e génération, hydrogène, biocarburants de 3^e génération, transports, *smart-grids*, etc. En attendant, nous vous souhaitons une bonne et énergique lecture!

Les laboratoires



CEA-Liten
Le Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux travaille notamment sur les sources d'énergie électrique, solaire ou hydrogène.

VOIR PP. 2, 8, 11, 13 & 14



CEA-List
Les recherches du Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies portent sur les systèmes embarqués, les systèmes interactifs, les capteurs et le traitement du signal.

VOIR PP. 10 & 15



CEA-Leti
Le Laboratoire d'électronique et des technologies de l'information est l'un des principaux centres européens de recherche appliquée en électronique pour l'industrie.

VOIR PP. 10, 13 & 14



CEA-Ibeb
L'Institut de biologie environnementale et de biotechnologie du CEA s'intéresse à la toxicologie nucléaire, à la biologie végétale et à la microbiologie et développe des outils et des concepts innovants pour la détection d'agents toxiques.

VOIR PP. 9 & 12

Éditeur Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, R. C. S. Paris B77568019 | Directeur de la publication Xavier Clément | Rédactrice en chef Claire Abou | Rédactrice en chef adjointe Aude Ganier | Rédacteurs Stéphanie Delage, Patrick Philpon, Vahé Ter Minassian | Comité éditorial Alexandra Bender, Thierry Bosc, Danièle Imbault, Élisabeth Lefèvre-Rémy, Catherine Manglier, Christophe Perrin, Brigitte Raffray, Marie-Laurence Reynier, Emmanuelle Volant | Iconographie Micheline Bayard | Photographies de couverture DR | Diffusion Lucia Le Clech | Conception et réalisation @SPECFIQUE -www.specifique.com | N°ISSN 1163-619X | Tous droits de reproduction réservés. | Ce magazine est imprimé sur du papier PEFC Galaxi Keramik, issu de forêts gérées durablement.

HÉLIOBIOTECH CARBURE



© CEA-IBEB

Flacons de cultures de microalgues à la plateforme Héliobiotech à Cadarache.

TEXTE : Aude Ganier

BIOCARBURANTS

La plateforme de recherche sur les biocarburants de 3^e génération, Héliobiotech, vient d'être inaugurée sur le centre CEA de Cadarache. Ouverte aux partenaires académiques et industriels, elle permet l'étude des mécanismes biologiques d'organismes produisant naturellement des molécules à forte teneur énergétique. Objectif : accroître leur part de production d'énergie dans leur activité naturelle. À surface égale, certaines espèces pourraient en effet générer 10 à 20 fois plus de biodiesel que des cultures terrestres comme le colza ou le tournesol. Opérationnelles depuis 2008, les activités d'Héliobiotech s'appuient sur une trentaine de chercheurs et les meilleurs équipements disponibles pour accélérer la R&D : outils de criblage haut débit, instruments d'analyse, bioréacteurs instrumentés, banque de microalgues et de cyanobactéries, chambres de culture. Un investissement réalisé grâce aux soutiens du Contrat de projet État-région et du Fonds européen de développement régional.

TÉLEX

La **start-up HeliodeL** du CEA rejoint le pôle Minatec où elle pourra bénéficier de nombreuses compétences pour poursuivre ses innovations. Grâce à la technologie WireLED, elle entend positionner la France au meilleur niveau en divisant par 10 le prix du lumen (unité de mesure du flux de la lumière), tout en améliorant le rendement lumineux.

14,6

millions d'euros

C'est le montant des fonds que la société **Fermentalg**, *start-up* du CEA, a levé pour lancer le premier projet européen d'exploration industrielle des microalgues (Eima). Celui-ci vise à faire produire en masse, par les microalgues, des molécules d'intérêt pour des secteurs variés, dont celui, à terme, des biocarburants. Il rassemble des partenaires scientifiques (CEA, CNRS, INSA, IETRG) et industriels (Lactalis, Pierre Guerrin, Sanders, Rhodia).



© Schneider Electric

Borne de recharge réalisée dans le cadre du projet Velcri.

UNE RECHARGE ET ÇA REPART

TEXTE : A. G.

VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Proposer des solutions pour des temps de recharge des véhicules électriques de 5 à 10 minutes, en mode « station-service », à travers un système complet : batterie, chargeur intégré, gestion de la batterie, gestionnaire d'énergie, dispositif de communication avec la borne de recharge. Voici l'enjeu de la station EV Link installée à proximité de Grenoble par Schneider Electric, dans le cadre du projet Velcri¹ qui associe plusieurs partenaires, dont le CEA. Cette station abrite plusieurs espaces de recherche, de test et de démonstration pour les différents types d'infrastructures de recharge : domestiques, voirie, parkings publics ou privés. Un second dispositif sera mis en service courant 2012 à Chambéry.

note : 1. Projet Véhicule électrique à charge rapide intégrée.

LA REVUE DE PRESSE QUAND L'ACTUALITÉ SCIENTIFIQUE S'INVITE DANS LES MÉDIAS

> 1^{er} novembre 2011
La Recherche

STOCKAGE PRIORITAIRE

Le mensuel consacre un cahier spécial aux enjeux du stockage de l'électricité, chantier prioritaire pour déployer les énergies renouvelables. Différentes technologies et pistes de recherches y sont présentées, dont celles menées au CEA sur les batteries pour les usages embarqués et mobiles ou le stockage électrochimique: développement de matériaux innovants pour les électrodes, électronique de gestion, etc.



> 24 octobre 2011
20 minutes

SORTIE DE TERRE D'ITER

Longueur: 130 m; largeur: 90 m; profondeur: 17 m. Voici les mensurations de la fosse creusée dans le sol de Cadarache pour accueillir le futur réacteur expérimental de fusion nucléaire Iter. Le quotidien gratuit propose un état des lieux du chantier de ce projet international, initié en 2010 et rassemblant 34 pays, dont la France. Il annonce également qu'un premier convoi test des gigantesques pièces du réacteur, à assembler sur site est prévu en 2012.

◀ Chantier d'Iter.

> 06 octobre 2011
Valeurs actuelles

AVENIR ÉNERGÉTIQUE

Interrogé par l'hebdomadaire sur l'avenir du nucléaire en France, l'Administrateur général du CEA Bernard Bigot a confié: « Au CEA, nous ne sommes pas enfermés dans une vision "tout nucléaire". Notre enjeu est de remplacer les énergies fossiles (50 % de notre consommation) par les énergies renouvelables. » L'objectif pour ces dernières est la compétitivité économique qui passe par la recherche sur les rendements du solaire, de la biomasse, de l'éolien.

> 1^{er} novembre 2011
Sciences et avenir

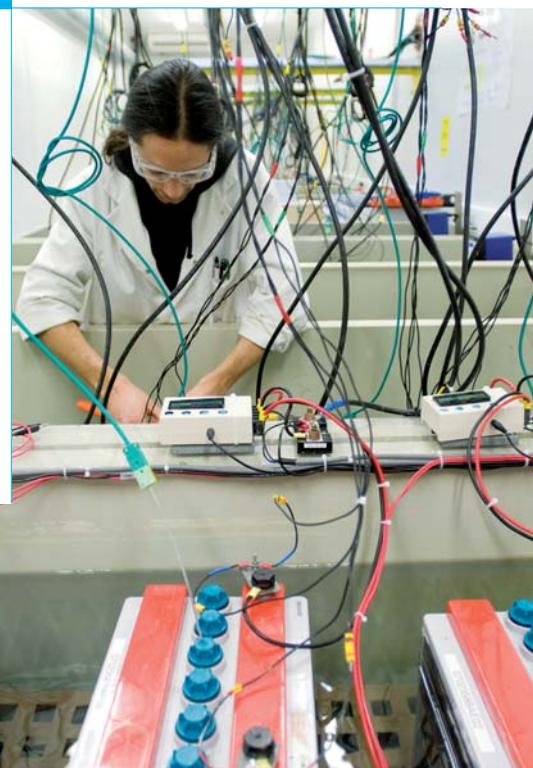
LE DIOXYDE DE CARBONE FORME DES FORMAMIDES

Issu de la combustion du pétrole, du gaz et du charbon, le dioxyde de carbone est le premier acteur du réchauffement climatique. « Et si l'on arrivait à en faire une matière première de la chimie du xx^e siècle? », s'interroge l'hebdomadaire qui annonce qu'une équipe de chercheurs, dont certains du CEA, a breveté une solution qui va dans ce sens en utilisant ce gaz pour produire des formamides... (voir p. 15).

> 14 octobre 2011
www.greenunivers.com

LES GRAALS VERTS

« Il reste des Graals dans lesquels tout est à inventer. Il en est ainsi du stockage de l'énergie ou du secteur des smart-grids par exemple », indique Bernard Maître, ingénieur au CEA et Président du Directoire d'Emertec, société de conseil et d'amorçage spécialisée dans les technologies propres. Une société créée par le CEA en 1999, dont la stratégie est détaillée par le site d'information économique et financière des marchés de l'environnement.



Tests de batteries au plomb. ▶

© L. Chamussy/Sipa/CEA



▲ Les recherches menées par le CEA sur les énergies nucléaire et renouvelables visent particulièrement les domaines des transports et de l'habitat.

STRATÉGIE

Nucléaire, solaire, biomasse, hydrogène, stockage de l'énergie, efficacité et sobriété énergétiques... Depuis des années, le CEA développe les briques technologiques de ces ressources alternatives aux combustibles fossiles pour les transports, l'habitat et les réseaux. Tour d'horizon, non exhaustif, de recherches menées en partenariat avec les acteurs industriels et académiques.

TEXTE : Aude Ganier

EXPERTISES POUR LES ÉNERGIES DE DEMAIN

Réduire la dépendance vis-à-vis des importations d'énergies fossiles et maintenir un prix bas pour l'énergie tout en préservant la compétitivité de l'industrie énergétique et en évitant les émissions de gaz à effet de serre : ces impératifs sont le moteur de la transition énergétique entamée par la France, au début du XIX^e siècle, et sur laquelle le CEA travaille activement. Depuis une vingtaine d'années, ses équipes innovent sur les briques technologiques d'un mix énergétique (nucléaire, solaire, biomasse, hydrogène) dans trois domaines (transport, habitat, réseau) en considérant les problématiques de stockage et d'efficacité énergétique. Il s'agit, en effet, de pouvoir répondre à des besoins énergétiques en forte croissance, en combinant une énergie de base qui doit être stable, comme le nucléaire, et des énergies intermittentes. Pour relever ces défis, le CEA opère le plus souvent en initiant des partenariats avec des acteurs industriels et académiques. Rien d'étonnant à ce qu'il succède à l'IFPEN¹, en octobre 2011, à la présidence de l'Ancre², alliance regroupant des organismes publics de recherche pour identifier les verrous scientifiques et technologiques prioritaires du secteur de l'énergie, et pour proposer des programmes de recherches coordonnés. Niveau coordination, le domaine du nucléaire a l'expé-

Il s'agit de pouvoir répondre à des besoins énergétiques en forte croissance.

rience de l'âge... tout comme le CEA qui accompagne le déploiement de l'électronucléaire en France depuis les années 1970. Aujourd'hui, l'activité de sa Direction de l'énergie nucléaire (CEA-DEN) se partage entre le soutien aux industriels (Areva, EDF) pour les réacteurs existants et à venir, et les recherches pour les réacteurs du futur, dits de 4^e génération. Aux centres de Saclay, Marcoule et Cadarache, la R & D menée sur les réacteurs à eau actuels innove autant sur l'exploitation des réacteurs,

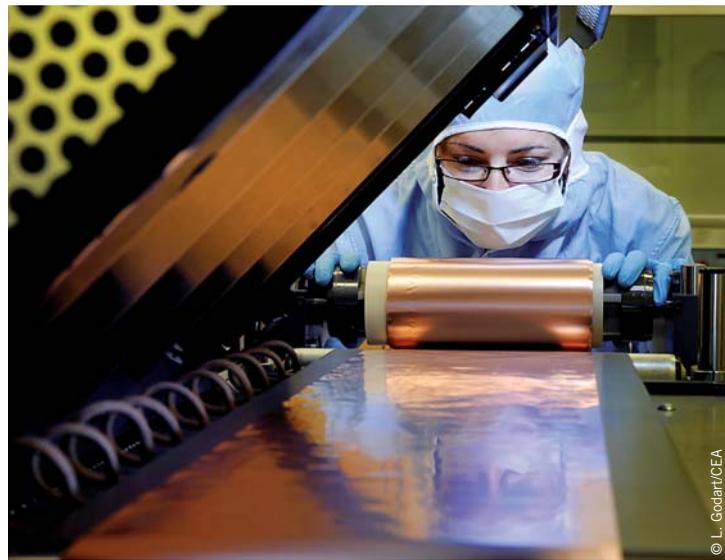
jusqu'au démantèlement, que sur la gestion et le stockage des déchets radioactifs. L'objectif principal est d'étendre la durée d'exploitation des réacteurs tout en améliorant leurs performances et leur sûreté. Une nécessité accrue par l'accident de Fukushima, à la suite duquel le CEA renforce sa R & D (notamment sur le comportement du corium et de l'hydrogène)

et sa gestion de la sûreté, éprouvée lors d'exercices renforcés avec des scénarios intégrant le cumul d'événements extrêmes. Concernant la 4^e génération, « l'enjeu est de développer un nucléaire toujours plus sûr et compétitif, économe >>>

notes : 1. L'Institut français du pétrole et des énergies nouvelles a assuré la présidence tournante de l'Ancre pendant deux ans. 2. Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie regroupant 19 organismes de recherche et composée de 9 groupes thématiques. <http://www.allianceenergie.fr>



▲ Culture de microalgues qui synthétisent des composés à forte teneur énergétique, étudiés au CEA-IBEB à Grenoble pour la production de biocarburants de 3^e génération.



▲ Réalisation d'une électrode négative, par enduction d'une encre de graphite sur un collecteur en cuivre, d'une batterie lithium-ion pour les véhicules électriques au CEA-Liten à Grenoble.

« Il est important de faire de la veille sur les technologies de stockage et de réseaux pour l'utilisation conjointe des énergies nucléaire et renouvelables. »

Frank Carré, Directeur scientifique au CEA-DEN

>>> *en ressources (utilisant plus de 90 % de l'uranium, contre 1 % dans les réacteurs actuels) et réduisant la part des déchets radioactifs à long terme* », explique Frank Carré, directeur scientifique au CEA-DEN.

Priorité à la filière « sodium »

Ces recherches, encadrées par la loi du 28 juin 2006, portent sur deux systèmes de réacteur à neutrons rapides : l'un refroidi au sodium et l'autre au gaz. Priorité est donnée à la filière « sodium » pour laquelle le CEA développe, avec ses partenaires industriels et le soutien du CGI³ au titre des Investissements d'avenir, le projet Astrid de prototype pour l'horizon 2020. Pour mener à bien ses missions, il s'appuie sur des recherches de base en physique, chimie et matériaux et développe des programmes de simulation numérique et de grandes infrastructures expérimentales. Par exemple, le réacteur européen expérimental RJH, en cours de construction à Cadarache, prendra le relais du réacteur Osiris de Saclay pour tester de nouveaux matériaux et combustibles. « À côté des enjeux majeurs que sont l'exploitation du parc électronucléaire français et la préparation de la 4^e génération, il est important d'entretenir une activité de veille sur les technologies de stockage et de réseaux permettant d'optimiser l'utilisation conjointe des énergies nucléaire et renouvelables. Avec ses partenaires de

note : 3. Commissariat général à l'Investissement.

l'Ancre, le CEA rassemble toutes les compétences pour y parvenir », conclut Frank Carré.

La proximité du nucléaire et des renouvelables, c'est à Cadarache qu'elle s'initie dès 1990 ; du fait d'un partage de compétences qui permet au laboratoire Genec de mener des recherches sur l'énergie solaire. Depuis, ces activités sont transférées à l'Ines⁴ pour fédérer les équipes de la région grenobloise où est créé le CEA-Liten, en 2006. La première approche concerne le **solaire photovoltaïque** pour lequel les équipes affichent des rendements de 21 % de conversion électrique, avec pour objectif 24 à 25 %. « Nous venons de transférer une partie de nos activités au LabFab, à l'Ines. Cette petite usine d'une capacité de 35 MW doit nous permettre de valider économiquement le modèle en travaillant avec les mêmes contraintes qu'un industriel », indique Didier Marsacq, directeur du CEA-Liten. Le **solaire à concentration thermique** est la seconde approche avec le développement de plusieurs technologies selon les niveaux de puissance envisagés, et selon leur couplage avec d'autres applications. « Nous nous intéressons depuis peu à cet axe, alors nous sommes dans l'innovation permanente, à tous les niveaux, grâce à un prototype de centrale sur Cadarache », assure Nicole Mermilliod, responsable du programme transverse CEA Nouvelles technologies pour l'énergie (NTE). La biomasse est l'autre ressource clé sur laquelle mise le CEA pour la production de composants chimiques à forte teneur

note : 4. Institut national de l'énergie solaire, créé en 2005 au Bourget-du-Lac par le CEA, le CNRS et l'Université de Savoie.

Solaire photovoltaïque // Technologie de conversion de la lumière du Soleil (photons) directement en électricité.

Solaire à concentration thermique // Technologie de conversion de la lumière du Soleil (photons) directement en chaleur.



▲ Vérification de modules photovoltaïques d'un panneau solaire, après leur encapsulation selon le procédé Nice, développé au CEA-Liten à l'Ines.



▲ Cellule blindée du laboratoire Atalante au centre CEA de Marcoule, où sont notamment développés les combustibles pour les réacteurs de 4^e génération.

énergétique. La transformation thermo-chimique de composés **lignocellulosiques**, étudiée depuis 2005 à Grenoble, permet de produire des **biocarburants de 2^e génération**, avec des rendements supérieurs à 30 % grâce à l'ajout d'hydrogène lors du processus de conversion. Les innovations en la matière portent sur les briques technologiques des procédés de torréfaction et de gazéification, comme au sein du projet BioTFuel. De façon complémentaire, le CEA étudie la faisabilité technique et économique d'une chaîne complète de production de biodiesel et de biokérosène sur site unique. À ce titre, le démonstrateur préindustriel Syndièse, à Bure-Sudron (Haute-Marne), doit préfigurer la création d'une filière française. Le CEA oriente également ses

recherches pour lever les verrous technologiques des **biocarburants de 3^e génération**. Depuis plus de quinze ans, des laboratoires de Saclay, Fontenay-aux-Roses et Cadarache analysent la capacité de micro-organismes à produire de l'hydrogène, de l'éthylène ou d'autres composés énergétiques comme les lipides. La récente inauguration de la plateforme Héliobiotech à Cadarache doit permettre aux chercheurs du CEA-IBEB d'accroître cette part de production.

Le stockage, le « nerf de la guerre »

Parmi toutes les briques technologiques développées au CEA, celles concernant l'hydrogène promettent différents types d'applications. En 2006, les équipes du CEA- >>>

Lignocellulose // Composé présent dans la paroi des cellules des végétaux, du bois, de la paille.

Biocarburant de 2^e génération // Carburant de synthèse produit à partir de matériaux organiques, provenant de résidus forestiers et de la partie non comestible des végétaux, comme la paille.

Biocarburant de 3^e génération // Carburant de synthèse issu des composés énergétiques produits par des micro-organismes, comme les algues ou les cyanobactéries

FUSION NUCLÉAIRE

VERS UNE NOUVELLE SOURCE D'ÉNERGIE

Rajouter sur Terre les réactions énergétiques à l'œuvre dans les étoiles ! Voici l'enjeu de la fusion nucléaire, processus où deux noyaux atomiques s'assemblent pour former un noyau plus lourd... sous certaines conditions : générer une puissance de 500 MW en n'en consommant que 50 durant 406 secondes ; et maintenir les réactions de fusion dans un plasma pendant 3 000 secondes. Depuis cinquante ans, des recherches sont initiées dans le monde

pour relever le défi. Celles du CEA ont lieu à Cadarache, sur Tore Supra, réacteur expérimental de fusion par confinement magnétique. Les échelles de puissance et de température sont telles que 34 pays décident, en 1986, de s'unir au sein du projet international Iter, tout en poursuivant leurs recherches. Le chantier démarre en 2007 à Cadarache avec l'objectif, en 2020, de démontrer la faisabilité scientifique et technique du contrôle d'un plasma thermonucléaire dans un réacteur.

>>> Liten l'utilisent avec succès comme carburant d'une **pile à combustible** (PAC) développée en partenariat avec PSA Peugeot Citroën ; pile qui alimentera demain certains types de véhicules. L'hydrogène et la PAC s'avèrent également utiles en soutien aux énergies intermittentes. À l'antenne corse de l'Ines, le CEA et la société Héliion démarrent un démonstrateur de stockage massif couplé à un champ solaire pour valider le modèle suivant : l'énergie solaire fournit l'électricité pour alimenter un **électrolyseur** qui produit de l'hydrogène ; ce dernier est stocké ou utilisé pour générer, *via* une PAC, de l'électricité. Parallèlement, les recherches visent la diminution des coûts de fabrication des PAC, notamment en réduisant les quantités de platine dans ses composants, et l'optimisation des capacités et de la sûreté des réservoirs de stockage. La problématique du stockage est en effet le « nerf de la guerre » pour que se développent les énergies alternatives. Il s'agit de répondre à une demande croissante qui se matérialise par une augmentation notable des pics de

Améliorer la prévision des flux des énergies intermittentes pour adapter l'offre à la demande.

draulique pour le stockage thermique. Cela consiste, par exemple, à emmagasiner la chaleur de l'été dans des matériaux à changement de phase qui peuvent la restituer au changement de saison. « *Les trois maisons du projet Incas d'Ines permettent de tester le stockage massif saisonnier en fonction de l'inertie du bâtiment, de ses matériaux de construction, etc.*, indique Didier Marsacq, qui poursuit sur les applications transport. *Nous avons développé une technologie batteries lithium-ion qui permet actuellement à un véhicule d'avoir une autonomie de 150 km. Notre objectif est de la doubler, tout en réduisant les coûts et en optimisant la sûreté des dispositifs.* » Pour ce faire, la plateforme Steeve ouvre en 2010 à Grenoble et équipe actuellement 10 voitures par mois, grâce à la maîtrise de l'ensemble de la chaîne de conception (de la chimie des batteries jusqu'à l'intégration de l'électronique embarquée, ici gérée par le CEA-Leti). Des recherches sur les nanomatériaux se poursuivent par ailleurs à Grenoble, au CEA-Inac. Toutes ces compétences attirent des partenaires, comme Renault en 2009, ou se déploient dans des *start-up*, dont Prolion qui fabrique à façon des batteries pour diverses applications.

De l'intermittence à l'intelligence

« *Avec ces différentes sources d'énergie électrique et modes de consommation, l'offre doit être adaptée à la demande. Et comme certaines ressources sont intermittentes, il faut améliorer la prévision des flux pour optimiser leur disponibilité.* » Ce challenge d'efficacité, tel que présenté par Didier Marsacq, est toute la raison d'être des **smart-grids**. Cette technologie, sur laquelle le CEA se mobilise aujourd'hui, repose sur l'apport d'intelligence aux réseaux actuels combiné à des véhicules et des bâtiments « intelligents », notamment sous forme de capteurs et de logiciels. À nouveau, les compétences des instituts Leti, List et Liten convergent avec comme outil de test le microréseau Prisme de l'Ines, composé de 80 kW d'énergie photovoltaïque, 100 kWh de batteries et des bornes solaires de recharge pour les véhicules. Les maisons Incas sont également intégrées au projet pour des tests grandeur nature. Ces technologies s'inscrivent dans les initiatives **Green IT** pour un meilleur équilibre entre efficacité et sobriété énergétique. Et pour asseoir son expertise aussi bien en amont qu'en aval, le CEA mène des recherches fondamentales pour comprendre les effets des usages énergétiques sur l'homme, le climat et l'environnement. Il conduit également à l'i-Tésé de Saclay des études technico-économiques sur les coûts de fabrication des systèmes, la disponibilité des matières premières, les cycles de vie des matériaux, etc. Autant d'éléments analysés pour orienter durablement les recherches.



© P. Stroppa/CEA

▲ Réalisation de la coque composite structurante d'un réservoir d'hydrogène au centre CEA/Ripault.

consommation. Or, ces énergies intermittentes ne pouvant être disponibles à tout moment, il faut pouvoir les stocker. Le CEA se positionne sur plusieurs approches : d'une part, l'utilisation conjointe des différentes ressources énergétiques (nucléaire, solaire, biomasse, hydrogène) ; d'autre part, le développement de plusieurs technologies de stockage selon les applications, dont certaines héritées du nucléaire, comme la thermohy-

Pile à combustible // Dispositif produisant de l'électricité grâce à l'oxydation de l'hydrogène sur une électrode avec de l'eau pour seul produit de réaction.

Électrolyseur // Dispositif permettant l'électrolyse : conversion de l'énergie électrique en énergie chimique par la séparation, grâce à l'électricité, de composés chimiques (hydrogène et oxygène) d'un élément (eau).

Smart-grid // Réseau « intelligent » de gestion de l'électricité, utilisant des technologies informatiques de manière à optimiser la production et la distribution.

Green IT // Concept désignant un état de l'art informatique visant à réduire l'empreinte écologique, économique et sociale des technologies de l'information et de la communication, tant dans leur conception que dans leur utilisation et fin de vie.

À la pointe

Stocker plus efficacement l'énergie des batteries, optimiser la production d'hydrogène par des microalgues, diviser par quatre la consommation des luminaires, recycler le CO₂ en matière première pour l'industrie, modéliser la dynamique d'un cœur de réacteur nucléaire ; l'expertise du CEA sur les énergies bas carbone donne lieu à des applications toujours plus innovantes.

SOUS LE SOLEIL CONJOINTEMENT

Perfectionner les centrales thermiques solaires à concentration développées par le CEA pour le compte de la société française Alcen : voici l'objectif de l'étude conjointe lancée par le CEA-Liten et la fondation MAScIR¹ en vue de l'implantation de ces centrales au Maroc. L'accord, prévu pour trois ans, comprend la formation d'une équipe commune de R & D sur les composants des centrales, le système de stockage de la chaleur et l'adaptation à un fonctionnement sous un climat désertique.

note : 1. Moroccan Foundation for Advanced Science, Innovation and Research.



© DR

10 % des brevets mondiaux

La production d'hydrogène par électrolyse de la vapeur d'eau à haute température (EVHT) est la voie empruntée par le CEA dans ses différents programmes collaboratifs et industriels. Pour protéger sa propriété intellectuelle, il pratique une politique volontariste de dépôts de licences qui représentent aujourd'hui 10 % des brevets mondiaux sur l'EVHT.

140 kWh de stockage

L'Ines va enrichir sa plateforme dédiée au stockage des énergies renouvelables en investissant dans la technologie d'emmagasinement de l'énergie solaire Sonick de la société FIAMM. Il s'agit d'installer 6 packs batteries sodium/nickel d'une capacité de stockage de 140 kWh et un système électronique innovant de conversion et de contrôle de l'énergie en vue de les tester.



© CEA-iBEB

▲
Culture de microalgues
en laboratoire.

UNE MICROALGUE SUPERPRODUCTIVE

TEXTE : Aude Ganier

PRODUCTION D'HYDROGÈNE

Optimiser la production d'hydrogène des microalgues ? Une possibilité qu'étudient des biologistes du CEA-iBEB, dans le cadre de leurs recherches sur la production de ce gaz précieux pour la synthèse de biocarburants. L'étude a consisté à insérer de manière aléatoire une séquence génétique dans la microalgue *Chlamydomonas reinhardtii*. Parmi les mutants ainsi créés, ils en ont isolé un qui affiche des rendements de production 3 à 5 fois supérieurs par rapport aux souches de départ. Les analyses ont montré que ce mutant n'exprimait plus un gène qui régule le processus de **photosynthèse**.

Photosynthèse // Conversion de l'énergie du Soleil en énergie chimique aboutissant à la production de composés organiques et d'oxygène moléculaire. Seuls certains organismes ayant une enzyme hydrogénase produisent de l'hydrogène au cours de ce processus.

Ce résultat ne fut pas surprenant pour le chercheur Gilles Peltier, du CEA-iBEB : « Cela a confirmé notre hypothèse selon laquelle, en dérégulant ce processus, nous créons des conditions extrêmes qui poussent les microalgues à s'adapter, notamment en surproduisant de l'hydrogène. » C'est du moins le cas du mutant, car les souches d'origine n'affichent pas les mêmes résultats. Les chercheurs savaient déjà que leur production d'hydrogène était fortement limitée par l'oxygène, produit lors de la photosynthèse, qui inhibe leur hydrogénase, enzyme impliquée dans la production d'hydrogène. Mais l'étude du nouveau mutant leur a permis de découvrir une autre limitation due à un frein dans le transfert d'électrons de la photosynthèse, frein se trouvant être levé chez le mutant... Des informations précieuses pour l'ingénierie des microalgues en vue d'une production maximisée d'hydrogène.

REFROIDIES POUR ÉCLAIRER PLUS LONGTEMPS

TEXTE : Stéphanie Delage

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Comment diviser par quatre la consommation électrique des lampes pour un flux lumineux identique à celui des lampes halogènes ? Voilà le défi lancé en 2010 par l'Ademe aux partenaires du projet Pacte LED, dont le CEA est partie prenante aux côtés de Philips. Ce programme de recherche vise à réduire les dépenses d'énergie et pourrait permettre d'économiser 1,4 TWh d'électricité chaque année. Le contrat est d'ores et déjà rempli, et même dépassé. « Nous avons mis au point une lampe à base de diodes électroluminescentes (LED) qui consomme 7 W pour une efficacité lumineuse équivalente à 35 W », expliquent Pascal Revirand et Adrien Gasse, chercheurs au CEA-Liten et CEA-Leti. Ces scientifiques se sont appliqués à concevoir un système d'éclairage facile à industrialiser, peu cher et doté d'une très bonne efficacité lumineuse : un produit « light » dans tous les sens du terme ! L'innovation tient principalement dans le système de refroidissement du produit. « La conception du radiateur a été optimisée non

Le programme de recherche Pacte LED vise à réduire les dépenses d'énergie et pourrait permettre d'économiser 1,4 TWh d'électricité chaque année.

seulement pour refroidir efficacement à la fois les diodes et la partie électronique de la lampe, mais également en respectant le ratio coût/performance du produit. » Grâce à la technique du surmoulage par injection, de fines pales en aluminium de 0,5 mm d'épaisseur sont immédiatement assemblées et le radiateur est intégré directement dans la lampe. Les résultats en termes d'efficacité ont dépassé les espérances des chercheurs. Ainsi, les objectifs initiaux, de 50 lumens/watt ont été non seulement atteints, mais largement dépassés. Les premiers prototypes, actuellement en test, ont été réalisés sur la plateforme technologique Poudr'Innov, mise en place par le CEA-Liten en 2010.



▲ Prototype d'une lampe à base de LED qui vise les économies d'énergie.



NOUVELLE ARCHITECTURE DE BATTERIES

TEXTE : Patrick Philipon

STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Un accumulateur électrique développé au CEA-Liten a récemment délivré une énergie de 150 Wh par kilo, une valeur jusqu'ici inégalée. Sa chimie n'a pourtant rien de révolutionnaire : il s'agit d'un « classique » accumulateur au lithium, avec une électrode négative au graphite et une électrode positive au phosphate de fer lithié (LiFePO₄). Le CEA explore cette voie depuis quelques années déjà, en raison de sa stabilité thermique. D'où provient alors une telle performance ? « Elle résulte de la combinaison de deux facteurs : d'une part le matériau de l'électrode, une nouvelle poudre de LiFePO₄-B développée par le CEA et fabriquée par un industriel, Prayon¹, et, d'autre part, la géométrie particulière de cet accumulateur », estime Séverine Jouanneau, responsable du Laboratoire de conception et de prototypage de batteries. Dans un accumulateur cylindrique classique, les électrodes et la

couche d'électrolyte sont enroulées sur elles-mêmes. Son laboratoire a préféré ici adopter une configuration dite « prismatique stackée ». En clair : une sorte de mille-feuille où ces mêmes éléments, découpés à un format rectangulaire, sont empilés les uns sur les autres. Il en résulte un accumulateur plat de la taille d'un portefeuille. Les électrodes ne subissant pas les contraintes mécaniques de l'enroulement, avec les risques de fissuration ou de délaminage qu'il comporte, il est possible d'y déposer une couche plus épaisse de matière active. Et donc de gagner en énergie.

Le démonstrateur qui a obtenu ce résultat, le seul existant à ce jour, a été assemblé au sein de la plateforme de prototypage du laboratoire. L'étape suivante consistera à passer à une production en série, sur une installation pilote du CEA-Liten qui fabrique aujourd'hui des accumulateurs cylindriques. « Il faut investir dans un équipement spécifique. Nous pensons démarrer la production en 2012 », prévoit la chercheuse.

note : 1. Groupe chimique international spécialisé dans les phosphates.

TÉLEX

Le CEA-Leti met en place la plateforme @Home qui doit permettre de maîtriser la complexité des dispositifs « intelligents » pour l'habitat. Les technologies développées devront respecter les contraintes zéro câblage et zéro maintenance, tout en répondant aux besoins d'interopérabilité.



© C. Dupont/CEA

MÉTAMORPHOSES CARBONIQUES

TEXTE : Vahé Ter Minassian

RECYCLAGE

▲ Laboratoire où a été mis au point le nouveau procédé de transformation du CO₂ en formamides.

Recycler le CO₂, déchet fort polluant de la combustion des ressources fossiles, en une matière première pour l'industrie chimique ? C'est possible, du moins dans les laboratoires du CEA-Iramis et du CNRS qui ont mis au point un procédé de transformation du gaz carbonique en formamides. Issues de la pétrochimie, ces molécules sont vendues chaque année par centaines de milliers de tonnes comme solvant pour la formulation et la synthèse des colles, des peintures et des médicaments. Jusqu'ici, les scientifiques jugeaient la chose peu plausible car le CO₂ est plutôt

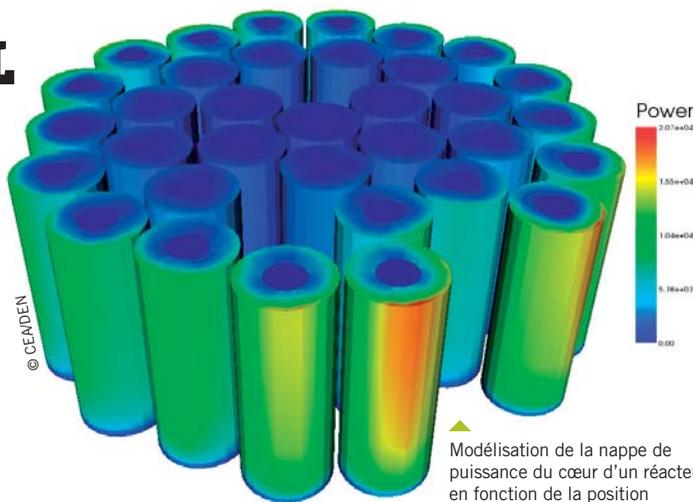
inerte ; ils ont toutefois réussi à le rendre plus réactif en le mettant en contact avec certaines espèces chimiques particulières jouant le rôle de source d'énergie (comme par exemple les organilosanes). « *Nous avons ainsi pu faire participer efficacement le CO₂ à des réactions chimiques pour synthétiser, à l'aide de catalyseurs organiques, des formamides* », indique Thibault Cantat, chercheur au CEA-Iramis. Rapide, peu coûteuse, s'appliquant à température ambiante, cette nouvelle méthode satisfait de plus aux exigences de la chimie verte, notamment en faisant appel à des sources d'énergie chimique et des catalyseurs organiques.

UN PILOTE VIRTUEL DANS LE RÉACTEUR

TEXTE : A. G.

MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Grâce à leur capacité d'absorption des neutrons, nécessaires à la fission nucléaire, les barres de commande sont un élément primordial du pilotage des réacteurs. Leur position dans le cœur l'est tout autant : plus ou moins insérées, elles contrôlent les réactions en chaîne ; totalement insérées, elles permettent l'arrêt total du réacteur. La réponse dynamique du cœur de réacteur, lorsque l'on fait bouger ces barres, est complexe à simuler. Les chercheurs du CEA-DEN ont toutefois réussi à la modéliser sur le cœur du réacteur du RJH¹, en fonction de l'évolution de la position de ces barres. Leur approche a consisté à coupler deux codes développés à la DEN, celui de neutronique Apollo3® et de thermo-hydraulique FLICA4, à l'aide de la plateforme Salome. « *Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de nos développements d'un nouveau système de codes de simulation en physique*



© CEA/DEN

▲ Modélisation de la nappe de puissance du cœur d'un réacteur en fonction de la position des barres de contrôle.

des réacteurs. Notre objectif est de fournir un outil complet pour les calculs multiphysiques des différents types de réacteurs existants et à venir», indique Christophe Calvin, chef de laboratoire au CEA-DEN. La simulation numérique joue en effet un rôle capital et croissant dans l'industrie nucléaire pour optimiser le fonctionnement, la sûreté et la durée de vie des réacteurs existants, ainsi que la gestion des déchets. Elle permet également de concevoir les systèmes du futur en imaginant des domaines de fonctionnement au-delà de ce que les expériences peuvent mesurer...

note : 1. Réacteur européen expérimental Jules Horowitz.

Mix énergétique

La production d'électricité, de chaleur et de carburants s'appuie sur différentes ressources. Leur répartition, et leur stockage, vise l'efficacité énergétique. Elle varie selon les régions, en fonction de facteurs climatiques, technologiques, géopolitiques et économiques. Exemple d'un mix énergétique possible.



Smart-grid

⚡ >> **Gestion de l'offre et de la demande en énergie** par mesure en temps réel des productions et consommations, et prévision des flux (selon la météo et les besoins pour transports, bâtiments et industries)

Stockage massif

🔋 >> **Stockage d'énergies intermittentes** en vue de les réinjecter dans le réseau électrique pour produire de l'électricité ou de la chaleur, au moment où elles font défaut.

Stockage local

🔋 >> **Stockage d'énergies pour des applications isolées**: recharge des véhicules électriques ou des piles à combustible, stockage d'appoint dans des batteries de véhicules, etc.

1 FOSSILES

Production d'électricité, de chaleur et de carburant à partir d'une source de chaleur issue de la combustion du gaz, du charbon, du pétrole.

2 NUCLÉAIRE

Production d'électricité à partir d'une source de chaleur issue de la fission d'atomes radioactifs.

3 HYDRAULIQUE

Production d'électricité à partir de l'énergie des barrages.

4 SOLAIRE

Production d'électricité et de chaleur à partir de l'énergie des rayons solaires, selon 2 technologies : photovoltaïque et concentration thermique.

5 BIOMASSE

Production de carburants (biodiesel et biokérosène), d'électricité et de chaleur à partir de composés lignocellulosiques (2^e génération) ou de microalgues (3^e génération).

6 ÉOLIEN

Production d'électricité à partir de l'énergie du vent.

7 HYDROGÈNE

Production, à partir de l'électrolyse de l'eau ou par des micro-organismes, et utilisation comme vecteur d'énergie pour les piles à combustible ou le stockage.

8 GÉOTHERMIE

Production de chaleur à partir des échanges thermiques entre le sous-sol et la surface de la Terre.

9 MARINES

Production d'électricité à partir de l'énergie des vagues, des courants des marées.

AU CEA

Depuis une vingtaine d'années, plusieurs instituts et laboratoires du CEA développent des briques technologiques pour optimiser l'utilisation conjointe des énergies nucléaires et renouvelables (particulièrement l'énergie solaire, celle de la biomasse et l'hydrogène). Les recherches portent sur les problématiques de production, stockage et utilisation sous l'angle d'une plus grande sobriété énergétique.

PROPOS RECUEILLIS PAR : Claire Abou

À L'ÉCOLE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE



© C. Abou/CEA

3 QUESTIONS À MARIE-FRANÇOISE DEBREUILLE

Inauguré en juin dernier, l'Institut international de l'énergie nucléaire (I2EN) est le point d'entrée à l'international de l'offre de formation française pour l'énergie nucléaire. Éclairage de Marie-Françoise Debreuille, Directrice de l'institut.

1

Quelles sont les premières actions de l'I2EN ?

M.-F. D. | Nous venons d'organiser une formation à la carte, baptisée *Train the trainers*¹, pour 13 universitaires polonais, dans le cadre d'un contrat négocié par l'Afni² avec le ministère de l'Économie polonais, qui se déroule en trois étapes : un tour de France organisé par Areva avec visites de sites industriels et de recherche ainsi que des rencontres avec des représentants de différents métiers du nucléaire ; 12 semaines de formation en génie atomique à l'INSTN³ ; puis un stage de 3 mois chez certains de nos partenaires⁴. Les demandes que nous recevons sont très variées. Nous les analysons et proposons des solutions adaptées, de l'accueil d'étudiants dans les meilleurs masters dédiés au nucléaire à des programmes sur mesure comme *Train the trainers*.

2

Pourquoi et comment a été créé l'I2EN ?

M.-F. D. | Même après l'accident de Fukushima, de nombreux pays expriment leur intérêt pour l'énergie nucléaire, en termes de sécurité d'approvisionnement et de gestion du mix énergétique de demain. La France a choisi de partager ses meilleures pratiques, notamment en matière de sûreté. C'est précisément pourquoi le gouvernement français a souhaité, sous l'impulsion du président de la République, la création de l'I2EN. Sur la base de la proposition remise au gouvernement par Catherine Cesarsky, Haut commissaire à l'énergie atomique, l'I2EN a été mis en place cette année et rassemble des ministères⁵, des industriels⁶, des académiques⁷ et des centres de recherche⁸, dont le CEA, également mandataire administratif et financier de l'I2EN et qui l'héberge dans les locaux de l'INSTN à Saclay. L'I2EN est ainsi l'acteur pour la formation qui représente l'ensemble de la filière nucléaire française.

3

Quelle est sa principale mission ?

M.-F. D. | Nous sommes la porte d'entrée à l'international de toutes les formations françaises dans le domaine de l'énergie nucléaire. Pour pouvoir conseiller et guider nos interlocuteurs étrangers, nous constituons une base de données complète des formations de niveaux masters et ingénieurs, couvrant tous les métiers nécessaires au déploiement d'une industrie nucléaire civile. Elle a été présentée en juin dernier au Conseil des formations de l'énergie nucléaire, présidé par Catherine Cesarsky.

« L'I2EN propose des solutions adaptées à toutes les demandes de formation, de l'accueil d'étudiants dans les meilleurs masters dédiés au nucléaire à des programmes sur mesure. »

■ Marie-Françoise Debreuille, Directrice de l'Institut international de l'énergie nucléaire.

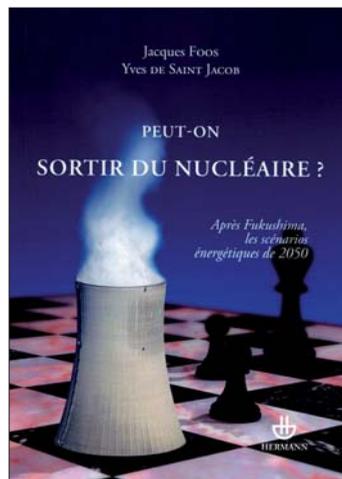
Elle compte 82 fiches décrivant toutes les formations avec, pour chacune, le poids relatif de l'enseignement de 33 compétences, comme par exemple la physique nucléaire, la conception des réacteurs, les procédés du cycle du combustible, sans oublier la sûreté et la maîtrise des risques. Nous entamons maintenant un travail similaire pour les formations de techniciens et pour la formation professionnelle.

notes : 1. Former les formateurs. 2. Agence France nucléaire internationale. 3. Institut national des sciences et techniques du nucléaire, hébergé par le CEA. 4. Andra, Areva, CEA, CNRS et EDF. 5. Ministères des Affaires étrangères ; de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement ; de l'Économie, des Finances et de l'Industrie ; de la Défense ; de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. 6. Actuellement Areva, EDF, SNCT. 7. Quinze organismes de formation, universités et grandes écoles. 8. Andra, CEA, CNRS.

Toutes les énergies seront les bienvenues

Une conviction : en 2050, les besoins en énergie de la planète doubleront, voire triple-ront. Dans ce contexte, quel sort réserver au nucléaire, remis en cause par l'accident de Fukushima? Les auteurs passent en revue toutes les sources d'énergie qui devront combler toutes les demandes. Le nucléaire en faisant nécessairement partie : « *Autant étudier ses problèmes avec soin, voir comment éviter les accidents, traiter la question des déchets et instaurer une gouvernance mondiale.* » Éléments de réponse dans cet ouvrage. —

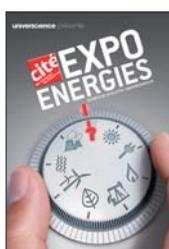
Peut-on sortir du nucléaire? | Jacques Foos et Yves de Saint-Jacob | Éd. Hermann | 19 €



Sylvain, au pays de l'or noir

Sans propulsion motorisée, l'auteur a parcouru le même trajet qu'une « *larme d'or noir de la haute Asie convoyée à travers steppes et monts jusqu'au ventre des tankers de Méditerranée* ». Le long des oléoducs, de la mer d'Aral à la Turquie, cet explorateur des temps modernes consacre son avancée solitaire à réfléchir au mystère de l'énergie, moteur de notre civilisation ou fruit de nos caprices. Pour lui, pétrole et force vitale procèdent du même principe car « *l'être humain recèle un gisement d'énergie que des forages propices peuvent faire jaillir* ». —

Éloge de l'énergie vagabonde | Sylvain Tesson | Pocket | 6,60 €



Exhibition durable

L'énergie s'expose! Et, avec elle, tous ses défis et solutions innovantes. Comment en effet satisfaire 7 milliards d'habitants qui consomment 4 fois plus qu'il y a 100 ans et dont les besoins vont se multiplier par 2 ou 3 d'ici à 2050? Cette exposition permanente, ouverte il y a plus d'un an, s'articule autour de deux parties. Elle propose de livrer un état des lieux de l'énergie sur Terre, puis d'aborder les problématiques à venir. Des espaces interactifs sont également proposés pour une approche plus individuelle de la question. —

Énergies, un défi pour le XXI^e siècle (exposition permanente) | Paris | Cité des sciences et de l'industrie.



Un mal nécessaire?

Le pic de production du pétrole semble être désormais atteint. Une réalité qui n'est pas sans poser de problèmes face à l'augmentation de la demande énergétique. En revanche, cette pénurie pourrait être une alliée de taille dans la lutte contre le réchauffement climatique afin d'éviter une hausse globale de 6 °C en 2100. Voici la thèse défendue dans cet ouvrage, qui met en balance les énergies et le climat en prenant soin de détailler toutes les connaissances actuelles en la matière. —

Énergies: une pénurie au secours du climat? | Adolphe Nicolas | Belin, coll. « Pour la science » | 6,60 €

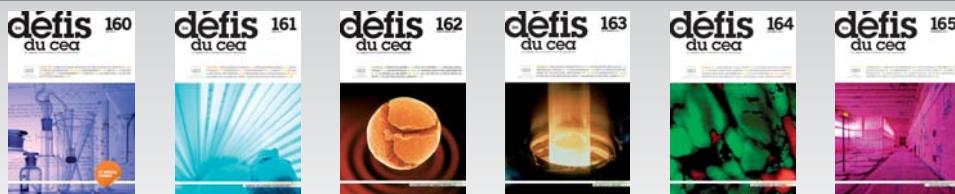


Chiffres clés 2011

État des réserves d'uranium et de pétrole, production d'électricité d'origine éolienne ou photovoltaïque des pays de l'UE, consommation d'énergie par habitant des grandes régions du monde, nouvelles mises en service de réacteurs nucléaires... Toutes ces informations, et bien d'autres encore, sont recensées dans ces deux manuels de référence du CEA-iTésé (Institut de technico-économie des systèmes énergétiques). Édités chaque année en français et en anglais, ils sont à télécharger sur www.cea.fr/le_cea/publications/autres_ouvrages

Mémentos sur l'énergie et sur les centrales nucléaires dans le monde | CEA-iTésé | www.cea.fr

ABONNEMENT GRATUIT



Abonnement en ligne sur <http://defis.cea.fr> ou par courrier, en nous faisant parvenir sur papier libre vos nom, prénom, adresse et profession à :
Les Défis du CEA, Abonnement, CEA-Bâtiment siège, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France.

QUE VOUS SUGGÈRE CETTE IMAGE ?

1. Électrodes embobinées d'une batterie de véhicules électriques
2. Enroulement de fibres de carbone et de résine d'un réservoir d'hydrogène
3. Gaine en zirconium d'un crayon de combustibles nucléaires

> Il s'agit des électrodes positive et négative, imprimées sur des feuillets en cuivre et embobinées pour constituer une batterie pour véhicules électriques et hybrides. Leur réalisation est assurée par le CEA-Liten sur la plateforme Steeve à Grenoble, chaîne complète de production qui va de la chimie des batteries jusqu'à l'intégration de l'électronique embarquée.