

N° 61

Printemps 2013

clefs

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



Les énergies bas carbone



Clefs CEA N° 61 – PRINTEMPS 2013

Image principale de couverture

Pour se soustraire à sa dépendance aux énergies fossiles, la France doit entamer une transition énergétique reposant, dans une logique de sobriété et d'efficacité énergétiques, sur une synergie entre l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables (énergies bas carbone). Le CEA y travaille activement.

L. Chamussy/Sipa-CEA – G. Lesénéchal/CEA – P. Avavian/CEA – P. Allard/REA-CEA

Images en médaillon

haut : Mise en place des outils de caractérisation dans une des maisons expérimentales de la plateforme Incas du CEA, située à l'Ines (Institut national de l'énergie solaire).
P. Avavian/CEA

bas : Mise au point et validation du système de gestion du pack batterie du véhicule démonstrateur du CEA.
P. Avavian/CEA

Pictogramme des pages intérieures

© Spécifique

Revue éditée par le CEA

Direction de la communication
Bâtiment Siège
91191 Gif-sur-Yvette Cedex - (France)
Tél. : 01 64 50 10 00
Fax (rédaction) : 01 64 50 17 22

Directeur de la publication
Xavier Clément

Rédactrice en chef

Martine Trocellier
martine.trocellier@cea.fr

Comité scientifique

Susana Bahri, Bernard Bonin,
Hélène Burlet, Gilles Damamme,
Catherine Fillet, Étienne Klein,
Fabienne Lebrun, Gérard Sanchez

Iconographie
Florence Klotz

Suivi de fabrication
Lucia Le Clech

Abonnement

L'abonnement à la revue *Clefs CEA* (version papier) est gratuit.
Les demandes d'abonnement doivent être adressées, de préférence par Internet, à l'aide du formulaire disponible à l'adresse : <http://www.cea.fr> ou par télécopie au 01 64 50 20 01

ISSN 0298-6248
Dépôt légal à parution

Réalisation

Efil – 3 impasse Pellerault – 37000 Tours
Tél. : 02 47 47 03 20 – www.efil.fr

Fabrique imprimure
(Saint-Yrieix-la-Perche)

Réalisation des supports électroniques
Calathea Paris - Tél. : 01 43 38 16 16
ISSN 1625-9718
Clefs CEA (En ligne)

À l'exclusion des illustrations, la reproduction totale ou partielle des informations contenues dans ce numéro est libre de tous droits, sous réserve de l'accord de la rédaction et de la mention d'origine.

© 2013 CEA

RCS Paris B 775 685 019
Siège social : Bâtiment Le Ponant D,
25 rue Leblanc, 75015 Paris

Les énergies bas carbone

2 **Avant-propos,**
par Bernard Bigot

4 **La puissance du concept d'énergie,**
par Étienne Klein

7 **À la recherche du mix énergétique idéal,**
par Jean-Guy Devezeaux de Lavergne

11 **Énergie électrique et émissions de CO₂,**
par Henri Sifa

I. PRODUCTION DE L'ÉNERGIE

12 Introduction, par Frank Carré

14 **Le nucléaire après Fukushima,**
par Alain Leudet et Alain Porracchia

18 **Le cycle de vie du nucléaire**

18 Le cycle du combustible nucléaire,
par Bernard Boullis

23 Assainissement et démantèlement des installations nucléaires,
par Didier Dall'ava,
Frédéric Tournebize,
Bernard Comte et Didier Lelievre

26 **ASTRID, démonstrateur technologique du nucléaire de 4^e génération,**
par François Gauché



29 **La fusion, une source d'énergie pour l'avenir,**
par Alain Bécoulet

32 **Le solaire photovoltaïque**

32 Technologies photovoltaïques et production centralisée d'électricité,
par Philippe Malbranche

36 Production décentralisée d'électricité : le solaire intégré au bâti,
par Benjamin Boillot

38 Le photovoltaïque à concentration,
par Mathieu Baudrit



40 **Le solaire à concentration : l'autre alternative pour la production d'électricité**

40 Concentrer l'énergie du soleil,
par Patrice Tochon et Bernard Thonon

44 Les promesses du stockage thermique,
par Jean-François Fourmigué

46 **Biocarburants de 2^e génération : le projet Syndièse,**
par Thierry Pussieux

49 **Des microalgues pour la production de biocarburants,**
par Fred Beisson, Yonghua Li-Beisson,
Gilles Peltier, Giovanni Finazzi,
Éric Maréchal, Franck Chauvat,
Florian Delrue, Karine Froment
et Vincent Blet

53 Axes de R&D du CEA pour développer des énergies bas carbone économiquement et socialement viables,
par Nicole Mermilliod
et Hélène Burlet

II. TRANSFORMATION, STOCKAGE, TRANSPORT ET DISTRIBUTION

54 Introduction, par Pierre Serre-Combe

56 Énergie en batteries

56 Des batteries pour la mobilité électrique, par Daniel Chatroux

60 Des batteries pour les applications stationnaires, par Marion Perrin



62 Optimiser la sécurité des batteries lithium, par David Descarsin et Johann Lejosne

64 L'hydrogène, un vecteur énergétique inépuisable

64 Le stockage de l'hydrogène, par Olivier Gillia

68 L'hydrogène, moyen de stockage de l'électricité, par Benjamin Guinot, Florent Montignac et Isabelle Noirot

71 Smart grids : quand les réseaux électriques deviennent intelligents, par Marc Barthélémy et Xavier Le Pivert



III. POUR UNE MEILLEURE UTILISATION DE L'ÉNERGIE

74 Introduction, par Jean-Pierre Joly

76 La mobilité solaire, par Franck Barruel

78 Chimie verte, biocatalyse et biomimétisme, par Vincent Artero, Véronique de Berardinis, Stéphane Ménage et Jean Weissenbach

81 Les nanosciences et les nanotechnologies pour l'énergie, par Yves Samson

84 Les transports électriques, par Laurent Antoni

87 La compétitivité des déplacements électriques, par Alain Le Duigou, Yuan Guan et Aïmen Smatti



88 Améliorer la performance énergétique de l'habitat, par Jean-Louis Six, Stéphanie Riché et Frédéric Suard

92 Valoriser la chaleur du nucléaire pour des applications non électriques, par Henri Safa

95 Institutions et organismes : qui fait quoi ?

97 Glossaire



Le CEA, acteur majeur en matière de recherche, de développement et d'innovation

Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives intervient dans quatre grands domaines : les énergies bas carbone (nucléaire et renouvelables), les technologies pour l'information et les technologies pour la santé, la conception et l'exploitation des Très grandes infrastructures de recherche (TGIR), la défense et la sécurité globale. Pour chacun de ces quatre grands domaines, le CEA s'appuie sur une recherche fondamentale d'excellence et assure un rôle de soutien à l'industrie. Le CEA est implanté sur 10 centres répartis dans toute la France. Il développe de nombreux partenariats avec les autres organismes de recherche, les collectivités locales et les universités. À ce titre, le CEA est partie prenante des alliances nationales coordonnant la recherche française dans les domaines de l'énergie (Ancre), des sciences de la vie et de la santé (Aviesan), des sciences et technologies du numérique (Allistene) et des sciences de l'environnement (AllEnvi). Par ailleurs, une importance particulière est portée à l'enseignement et à l'information du public, afin de favoriser le transfert des connaissances et le débat sciences/société. Reconnu comme un expert dans ses domaines de compétences, le CEA est pleinement inséré dans l'espace européen de la recherche et exerce une présence croissante au niveau international.

Précisions

Les termes figurant dans le glossaire (p. 97) apparaissent en **bleu** dans les textes à leur première occurrence. Les noms apparaissant en **vert** renvoient à la page 95.



Avant-propos

Chacon le sait, la disponibilité d'une énergie suffisamment abondante, aisément mobilisable et compétitive conditionne le développement économique et social d'un pays. Malgré les efforts de sobriété et l'amélioration de l'efficacité énergétique qu'il fera, le monde va devoir faire face à des besoins grandissants d'énergie, puisque d'ici 2050 la population de la planète devrait augmenter de plus de 30 % et que plus d'un milliard de personnes aspirent légitimement dès maintenant à voir leur consommation croître fortement pour leur permettre d'atteindre un niveau de vie satisfaisant. Le champ de contraintes est très fort, étant donné que plus de 80 % de la consommation primaire mondiale d'énergie repose actuellement sur les énergies fossiles, alors que leur épuisement et leur renchérissement sont inéluctables et que leur consommation massive augmente les risques sanitaires, environnementaux et de changement climatique. La preuve en est que l'accroissement de la demande a été de plus de 25 % entre 2002 et 2010.

La France qui importait pour 23 milliards d'euros d'énergies fossiles en 2005 a pratiquement multiplié par trois ses dépenses en 6 ans, pour atteindre 62 milliards d'euros en 2011, soit 90 % de notre déficit commercial 2011. Et s'il y a bien une certitude sur le moyen-long terme, c'est que le prix des énergies fossiles ne peut être pour notre pays que de plus en plus pénalisant. L'exploitation des gaz et huiles de roches-mères, si elle se réalise, ne fera que repousser de quelques décennies au plus l'échéance. L'impératif est donc de réduire, avec le reste du monde, dès que possible, notre consommation de produits fossiles, au profit des énergies décarbonées domestiques. Dans notre cas, ce sont les énergies renouvelables et

nucléaire. Nous ne pouvons qu'en être bénéficiaires : forte amélioration de notre balance commerciale, forte diminution des impacts sanitaires, environnementaux et climatiques, et prolongation de la disponibilité de ces ressources naturelles pour les usages difficilement substituables. Je défends fortement l'idée d'un bouquet énergétique à base de ces énergies nucléaire et renouvelables en jouant au mieux de leur complémentarité. Il est urgent de le décider afin de mettre en place progressivement les financements nécessaires et en œuvre, grâce à nos investissements de recherche et développement, les évolutions technologiques indispensables, en valorisant ainsi au mieux nos atouts.

Il est primordial, dans le cadre du débat énergétique qui débute, de garder ouvert un large spectre d'options et de développer des synergies entre les sources d'énergie : l'énergie nucléaire, en tant que source continue, massive et programmable d'électricité et de chaleur, répondant aux besoins de base incompressibles d'un pays pour sa partie fortement urbanisée et industrialisée, et les énergies renouvelables, source intermittente, diffuse, pouvant répondre, en la combinant avec des capacités adaptées de stockage qui réduisent d'autant la dimension des réseaux d'interconnexions, à des besoins plus flexibles et dont il faut favoriser la consommation locale, au plus près de la production.

Le CEA, devenu en 2010 le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, participe activement à la réflexion sur la transition énergétique, au travers notamment de l'alliance Ancre (Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie). Il apporte ainsi sa contribution aux réflexions engagées au niveau national : exercice « Énergies 2050 » à l'automne 2011, débat national sur la transition énergétique lancé en novembre 2012. Dans le cadre de ce débat, la ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie a demandé à l'Ancre d'apporter des éclairages sur les « futurs » possibles pour la France, dans un contexte européen et mondial, en focalisant son approche sur les aspects scientifiques et technologiques, en éclairant les potentialités associées aux ruptures et innovations technologiques. La transition énergétique est nécessaire et le CEA, avec les compétences qui sont les siennes, souhaite y apporter toute sa contribution en tant qu'un acteur majeur de la recherche et de l'innovation dans le domaine de l'énergie.

Le CEA mène des recherches dans le domaine de l'énergie nucléaire, qui reste une énergie d'avenir, y compris après l'accident de Fukushima, dont nous devons tirer tous les enseignements pour garantir, en toutes circonstances, la parfaite sûreté du fonctionnement des installations.

**« Je défends fortement
l'idée d'un bouquet
énergétique à base
des énergies nucléaire
et renouvelables
en jouant au mieux de
leur complémentarité. »**

Les études sont activement poursuivies sur l'énergie de fission, notamment au travers du projet de réacteur prototype de 4^e génération ASTRID, comme sur l'énergie de fusion, en support au projet ITER.

Le CEA conduit avec la même détermination des recherches sur le solaire photovoltaïque classique ou à concentration, le solaire thermodynamique et les possibilités de stockage thermique.

Pour faciliter l'adaptation instantanée entre l'offre et la demande d'électricité, le CEA s'intéresse avec une haute priorité d'une part, au développement de l'intelligence dans les réseaux électriques et d'autre part, aux différents modes de stockage massifs ou diffus de l'électricité. Les systèmes de stockage électrochimique (batteries, piles à combustible...) font l'objet d'une recherche intensive.

Cette démarche d'innovation s'appuie sur des ruptures technologiques avec l'utilisation de nanomatériaux et des ruptures systèmes.

Dans les transports, il s'agit de remplacer les motorisations exclusivement thermiques par des véhicules électriques ou hybrides, de développer l'usage de l'hydrogène, les performances des piles à combustible et des biocarburants de 2^e génération (en particulier avec le projet Syndièse) et de 3^e génération avec les microalgues par exemple, qui sont d'autres moyens de stockage à grande échelle des énergies renouvelables. Les possibilités d'un couplage intelligent entre différentes technologies sont souvent issues de l'analyse minutieuse des modes de vie. Le couplage entre des panneaux solaires photovoltaïques placés sur un toit qui alimentent un véhicule électrique en stationnement en est un excellent exemple. C'est cette expérience que nous menons à l'Ines (Institut national de l'énergie solaire).

Enfin, la réflexion et les recherches du CEA portent sur une utilisation optimisée et efficace de l'énergie, que ce soit dans les transports, dans l'industrie ou dans l'habitat, qui représentent la plus grande part de notre consommation en énergies fossiles, en valorisant par exemple la chaleur issue du nucléaire ou grâce aux matériaux bio-inspirés ou aux nanosciences.

Le véritable objectif national à atteindre est donc bien de substituer les énergies fossiles, qui constituent aujourd'hui en France les deux tiers de la consommation finale d'énergie, par des énergies renouvelables, sous réserve d'améliorer fortement leur compétitivité économique. Songeons qu'en 2013, le surcoût de l'électricité renouvelable (environ 4 % de la consommation totale) représentera en France pour les consommateurs au moins 3,6 milliards d'euros et pour nos amis allemands au moins 18 milliards (environ 18 % de leur consommation totale d'électricité). L'utilisation croissante des énergies renouvelables, qui sont majoritairement productrices d'électricité, va conduire

inégalement à augmenter la part d'électricité dans notre consommation (actuellement environ 50 %) et donc réduire mécaniquement celle du nucléaire – en 2012, elle a été de 79 % – quand bien même la production nucléaire resterait en volume voisine de ce qu'elle est aujourd'hui.

Je remercie tous ceux qui ont contribué à rédiger cette édition passionnante de *Clefs CEA* et invite ses lecteurs à découvrir l'implication et les réalisations du CEA dans le domaine des énergies bas carbone. Les enjeux énergétiques auxquels nous sommes confrontés méritent que chacun soit pleinement informé des développements scientifiques et technologiques s'offrant à nous dans le domaine des énergies nucléaire et renouvelables qui seront incontestablement des composantes complémentaires d'importance croissante dans le mix énergétique national et mondial.

> Bernard Bigot

Administrateur général du CEA

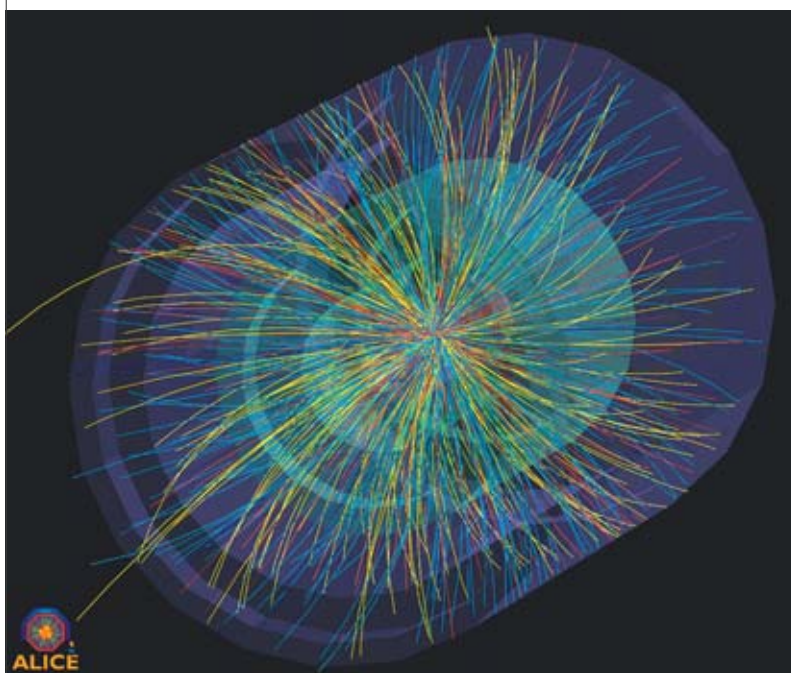


L. Godart/CEA



La puissance du concept d'énergie

Concept abstrait dont les applications ont transformé notre vie, l'énergie occupe une place centrale en physique. **Grandeur multiforme obéissant à une loi de conservation** – elle ne se perd pas, ni ne se crée à partir de rien – sa compréhension est le fruit d'un travail conceptuel étalé sur plus de deux siècles et mené par de nombreux chercheurs, physiciens et mathématiciens.



Conséquence de la conservation de l'énergie, l'invariance des lois physiques au cours du temps autorise les physiciens à recréer l'univers primordial en provoquant des collisions de particules, comme ici celles provoquées entre des ions lourds au sein du grand collisionneur de hadrons (LHC) du Cern à Genève.

Le mot énergie figure depuis environ trois siècles dans le vocabulaire de la physique, plus exactement, dans celui de la mécanique. Il n'y est pas entré par la grande porte.

Il est introduit, en français, par des mathématiciens du XVIII^e siècle. Jean Bernoulli est vraisemblablement le premier à avoir utilisé ce terme. Dans une lettre écrite au père jésuite Pierre Varignon, en date du 26 janvier 1717, le physicien et mathématicien suisse définit l'énergie comme le produit de la force appliquée à un corps par le déplacement subi par ce corps sous l'effet de cette force, ce que nous appelons aujourd'hui le **travail mécanique**. Cette première conception scientifique de l'énergie, appliquée uniquement aux forces statiques et à l'équilibre, était cependant trop limitée pour prétendre pouvoir coloniser toute la physique. De fait, l'énergie n'est devenue un concept central de cette science qu'un

siècle et demi plus tard, quand il a été établi de façon claire qu'elle obéit à une règle implacable, celle d'une loi de conservation.

La conservation de l'énergie

Lorsque deux systèmes interagissent, ils échangent de l'énergie. Au cours de cette interaction, la somme des variations d'énergie dans le premier système est toujours l'opposée de la somme des variations d'énergie dans le second, de sorte que **l'énergie globale est conservée**. Ainsi, un ballon chutant dans l'atmosphère terrestre transforme son énergie de pesanteur en chaleur. Cette dernière est transmise à l'air *via* les forces de frottement dues à la force électromagnétique. Il y a conversion de l'énergie potentielle de la force de gravitation du ballon en énergie potentielle électromagnétique puis en énergie cinétique des molécules de l'air.

C'est le physicien allemand Max Planck, le futur inventeur du quantum, qui a le premier compris la portée essentielle de cette loi : au-delà de ses diverses manifestations empiriques, l'énergie doit d'abord et surtout être abstraitement considérée comme une grandeur qui se conserve. Dans un ouvrage publié en 1887, intitulé *Das Prinzip der Erhaltung der Energie* (*Le Principe de conservation de l'énergie*), il écrit : « Je ne traiterai du concept d'énergie que dans la mesure où il peut être rattaché au principe qui donne son titre à cet essai, supposant donc que le concept d'énergie en physique tient avant tout sa signification du principe de conservation qui le concerne⁽¹⁾ ». **L'énergie** trouve là sa définition formelle moderne :



Max Planck (1858-1947), père de la théorie des quanta, selon laquelle les échanges d'énergie entre le rayonnement et la matière se font de manière discontinue, par paquets ou quanta, et Albert Einstein (1879-1955), principal développeur de cette théorie, qui montra notamment que la masse est l'une des formes de l'énergie.

(1) Cité par l'historien des sciences Yehuda ELKANA dans « The Conservation of Energy: a Case of Simultaneous Discovery? », *Archives internationales d'histoire des sciences*, Paris, 23, 1970, p. 31-60.

une quantité qui peut être associée à tout système et qui est fonction des divers paramètres caractérisant l'état de ce système à l'instant considéré. Elle dépend en particulier des positions et des vitesses des parties du système et de leurs interactions mutuelles. Sa propriété la plus fondamentale est de rester constante au cours du temps lorsque le système est isolé.

Cette découverte fut le couronnement d'un processus long et laborieux, étalé sur pas moins de 40 ans. Elle n'est guère attribuable à un auteur particulier, mais à plusieurs chercheurs qui travaillaient de façon relativement isolée et avaient des préoccupations fort différentes. Faraday, Carnot, Joule, Mayer, Helmholtz, Thomson ou Rankine figurent parmi les plus célèbres d'entre eux.

Force, puissance et énergie

Comme c'est souvent le cas en physique, où la dénomination joue un rôle essentiel, la clarification du concept d'énergie a suscité un débat sémantique intense, ponctué d'avancées théoriques, au terme duquel les mots force, puissance et énergie, longtemps mêlés ou confondus, ont pu recevoir chacun une définition bien précise.

En 1847, l'allemand Hermann von Helmholtz publia un mémoire intitulé *Über die Erhaltung der Kraft* (*Sur la conservation de la force*) dans lequel se trouve énoncé ce qui deviendra par la suite le **premier principe de la thermodynamique**, à savoir la conservation de l'énergie. Or Helmholtz n'y parle pas d'énergie, mais de puissance ou de force, ce dernier terme ayant eu longtemps un double sens : à la fois capacité de produire le mouvement et réservoir de potentialités. Il faudra un important travail conceptuel sur ce qu'est la chaleur et la façon dont elle s'échange entre les systèmes, pour que ces notions⁽²⁾ soient clairement distinguées. La **puissance**, c'est le débit de l'énergie, le rythme auquel elle se trouve délivrée. Plus précisément, c'est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre. Conséquence de cette définition, deux systèmes de puissances différentes pourront fournir le même travail (la même énergie), mais le système le plus puissant le fera plus rapidement que l'autre. D'un point de vue mathématique, la puissance est égale au produit d'une grandeur d'**effort** (une force, un couple, une pression, une tension...) par une grandeur de **flux** (une vitesse, une vitesse angulaire, un débit, une intensité).

Le théorème de Noether : la pérennité des lois de la physique

Au début du XX^e siècle, un théorème crucial est venu encore renforcer la puissance conceptuelle de la loi de conservation de l'énergie. En 1918, la mathématicienne allemande Emmy Noether établit qu'à toute invariance selon un groupe de symétrie est nécessairement associée une quantité conservée en toutes circonstances, autrement dit une loi de conservation. Postulons par exemple que les lois de la physique sont invariantes par translation du temps, c'est-à-dire qu'elles ne changent pas si le choix de l'instant de référence, l'origine à partir de laquelle sont mesurées les durées, est modifié. Cela signifie que les lois régissant toute expérience de physique ne sauraient dépendre du moment particulier où l'expérience



Office of Press- and Public Relations, University of Göttingen

Mathématicienne allemande spécialiste d'algèbre abstraite et de physique théorique, Emmy Noether (1882-1935) démontre, en 1918, que les lois physiques et donc, plus particulièrement, la loi de conservation de l'énergie, sont invariantes au cours du temps.

est réalisée : pour elles, tout instant doit en valoir un autre, de sorte qu'il n'existe aucun instant particulier qui puisse servir de référence absolue pour les autres. Si le théorème de Noether est appliqué à l'invariance par translation du temps, il s'ensuit que son corollaire direct est la conservation de l'énergie. *A contrario*, imaginons que la force de pesanteur varie de façon périodique dans le temps, qu'elle est très faible chaque jour à midi et très forte à minuit. Il serait alors possible de monter quotidiennement une charge au sommet d'un immeuble à midi, puis la projeter dans le vide à minuit. L'énergie ainsi gagnée serait plus élevée que l'énergie dépensée. Il n'y aurait plus conservation de l'énergie.

La loi de conservation de l'énergie se trouve donc avoir une profondeur théorique qui dépasse largement sa formulation habituelle : elle exprime la **pérennité des lois physiques**, c'est-à-dire leur invariance au cours du temps. Les physiciens en tirent notamment parti pour explorer l'univers primordial : en provoquant de très violentes collisions de particules, ils créent – ou plutôt recréent – dans un tout petit volume et pendant une durée très brève, les conditions physiques extrêmes (très haute température et très grande densité d'énergie) qui étaient celles régnant dans un passé très lointain de l'Univers. Comme les lois physiques n'ont pas changé, les particules engendrées par l'énergie du choc⁽³⁾

(2) Dans le langage courant, certaines confusions persistent, les notions d'énergie et de puissance n'étant pas toujours distinguées. C'est ainsi qu'aux yeux de l'imaginaire collectif, le TNT demeure le symbole de l'énergie chimique. Pourtant, un kilogramme de TNT contient dix fois moins d'énergie qu'un kilogramme de pétrole. Ce qui ne l'empêche pas de pouvoir délivrer une forte puissance : au contact de l'air, il explose, de sorte que toute son énergie se trouve libérée en un temps très court. Un kilogramme de pétrole contient davantage d'énergie, mais il la libère plus tranquillement : la puissance associée est donc plus faible.

(3) En application de la formule $E=mc^2$, selon laquelle la masse est une forme possible de l'énergie.



Interactions fondamentales et énergie

Quelle quantité de matière faut-il solliciter pour disposer d'une quantité donnée d'énergie ? La réponse à cette question dépend très fortement de l'interaction utilisée. Supposons que l'on souhaite obtenir 1 kWh, c'est-à-dire l'énergie cinétique d'un camion de dix tonnes roulant à 100 km/h.

Si l'**interaction gravitationnelle** est utilisée, ou d'autres forces mécaniques, les quantités de matière nécessaires sont de l'ordre de quelques dizaines de tonnes. Ainsi, il faut faire chuter 10 tonnes d'eau d'une hauteur de 40 mètres pour obtenir 1 kWh d'énergie électrique dans une usine hydroélectrique dont

le rendement est de 85%. Pour obtenir la même quantité d'énergie avec une éolienne, il faut récupérer toute l'énergie cinétique de 20 000 m³ d'air – soit 27 tonnes – arrivant à une vitesse de 60 km/h.

Dans le cas où c'est l'**interaction électromagnétique** qui est exploitée, les quantités de matière à utiliser sont de l'ordre du kilogramme. Par exemple, la combustion des carburants fournit de la chaleur, à raison de 1 kWh par dixième de kg. Des chiffres comparables à ceux de l'énergie biologique ou calorifique : un bon repas, soit un kilogramme d'aliments, fournit environ 1 kWh, dissipé ensuite dans l'organisme, et il faut 1 kWh de

chaleur pour faire fondre 10 kg de glace ou faire bouillir 1,5 kg d'eau.

Pour l'**interaction forte** (interaction nucléaire), la quantité de matière nécessaire est encore plus faible. Lors de la réaction de **fission** dans une centrale nucléaire, il faut 10 mg d'**uranium naturel** (il contient 0,71% d'**uranium 235**) pour obtenir 1 kWh de chaleur. Ce chiffre peut être divisé par un facteur 100 dans un **surgénérateur**, en récupérant l'énergie de fission du **plutonium** produit par capture de neutrons par l'**uranium 238**. Enfin, dans le cas de la **fusion**, telle la fusion D-T (**deutérium-tritium**) qui se produit dans un **tokamak**, il suffit d'un milligramme de combustible pour obtenir 1 kWh.

revivent les emportements cinématiques⁽⁴⁾ torrides qui furent exactement ceux de leurs congénères dans la prime jeunesse de l'Univers, offrant ainsi une cure de jouvence spectaculaire à une infime portion de l'espace-temps⁽⁵⁾.

Les formes de l'énergie

L'énergie d'un système isolé demeurant constante au cours du temps, il est impropre de parler en toute rigueur, ainsi que cela est trop souvent fait, de production ou de consommation d'énergie, comme si l'énergie pouvait émerger du néant ou y disparaître. Dans tous les cas, il ne s'agit jamais que de changements de la forme que prend l'énergie ou de transferts d'énergie d'un système à un autre.

Produire de l'énergie électrique dans une centrale hydroélectrique signifie en fait que l'énergie potentielle de l'eau du barrage est transformée en énergie cinétique dans les conduites d'eau, puis que cette énergie cinétique est transférée aux turbines et au rotor des alternateurs pour être finalement transformée en énergie électrique. La **viscosité** de l'eau, les frottements et l'**effet Joule** soustraient de ce flux une faible partie de l'énergie, qui est transformée en chaleur.

Dans le même ordre d'idée, consommer de l'énergie électrique pour faire fonctionner un téléviseur, c'est en fait la transformer en énergie lumineuse émise par l'écran (en passant par l'énergie cinétique des électrons issus de la **cathode**), en énergie acoustique diffusée dans l'air ambiant (par l'intermédiaire des énergies cinétique et potentielle de la membrane du

haut-parleur) et surtout en chaleur inutile (principalement par effet Joule).

Parmi les diverses formes de l'énergie susceptibles de se transformer les unes en les autres, sont distinguées d'une part, celles qui sont emmagasinées dans la matière et, d'autre part, celles se manifestant lors d'un transfert d'un sous-système à un autre.

Parmi les énergies emmagasinées dans la matière, citons l'énergie interne d'un fluide, qui est fonction de sa température et de sa pression, l'énergie chimique d'un carburant, l'énergie nucléaire d'un morceau d'**uranium**, l'énergie électrochimique d'une **batterie**, l'énergie potentielle de l'eau d'un barrage dans le champ de pesanteur ou encore l'énergie cinétique d'un véhicule. La plupart de ces énergies ne sont accessibles que très indirectement.

Dans le second cas, il s'agit par exemple de la chaleur rayonnée dans l'air par un radiateur, du travail échangé entre un piston et le fluide qu'il comprime ou de l'énergie électrique circulant dans une ligne.

Maîtriser les formes de l'énergie pour les utiliser

Les technologies de l'énergie ont vocation à contrôler les divers processus de sa transformation afin de réduire la part des formes d'énergie inutiles et d'augmenter la part de la forme que l'on souhaite extraire. Le premier principe de la thermodynamique limite drastiquement les possibilités, la conservation de l'énergie imposant l'équilibre des bilans. D'autres contraintes proviennent du **second principe de la thermodynamique** selon lequel un système fermé perd de sa capacité à évoluer au fur et à mesure qu'il évolue (son **entropie** ne pouvant que croître). D'autres enfin sont liées à la hiérarchie des intensités des forces de la nature (encadré).

On comprend par là qu'en définitive, pour bien parler de l'énergie en physique, il faudrait parler de toute la physique.

➤ Étienne Klein

Institut rayonnement matière de Saclay (Iramis)
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay

(4) La cinématique étudie le mouvement des corps dans l'espace en fonction du temps sans considérer les causes qui produisent ce mouvement.

(5) En physique quantique, le vide n'est pas vide : il contient des particules dites virtuelles, qui sont bel et bien présentes mais qui n'ont pas assez d'énergie pour exister vraiment. Si deux particules provenant d'un accélérateur de haute énergie entrent en collision, elles offrent leur énergie au vide quantique. Du coup, les particules virtuelles qu'il contenait deviennent réelles et s'échappent. Le vide, qui était froid du fait de l'expansion de l'Univers qui n'a cessé d'abaisser sa température, soudain se réchauffe et les particules qui y étaient endormies retrouvent la vitalité qu'elles avaient dans l'univers primordial.

À la recherche du mix énergétique idéal

L'idée qu'il existe un mix énergétique idéal semble *a priori* assez simple. Une simplicité trompeuse. **En fonction des critères retenus – réduction des émissions de gaz à effet de serre, fiabilité technologique, coûts de l'énergie, sécurité de l'approvisionnement énergétique, acceptabilité sociétale, etc. – et de la place respective qui leur est assignée, plusieurs mix idéaux se dessinent.** Pour la France, qui dépend encore à 50 % des énergies fossiles pour sa consommation primaire d'énergie, le Gouvernement a décidé d'entamer une transition qui renforce la part des énergies décarbonées, mais selon quel mix ? Les travaux et les études menés par les chercheurs du CEA contribuent fortement à répondre à cette question. Ils soulignent l'importance de l'évaluation technico-économique dans l'élaboration de la trajectoire « objectif » du mix énergétique français.

Le mix énergétique idéal est un concept de nature très directement politique. À un moment donné, ce mix idéal ou, de manière plus pragmatique, mix objectif, incarne, s'il est formalisé, la cible des politiques économiques, techniques (R&D) et réglementaires, selon une logique de programme. Il dépend d'objectifs prioritaires tels que la diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES). Il est souhaitable que ce mix idéal/objectif soit redéfini de façon graduelle et sans à-coups majeurs, ces derniers induisant un gaspillage de moyens et des coûts économiques potentiellement très élevés. Depuis quelques années, trois axes ont émergé dans les réflexions menées sur un tel mix : l'importance du long terme, celle de la prise en compte des incertitudes et des risques, et la nécessité d'études économiques coûts-bénéfices pour les évaluer. Au plan opérationnel, si le rôle essentiel de la R&D dans l'atteinte des objectifs est bien établi, encore reste-t-il à mieux le quantifier.

Le mix français est encore majoritairement fossile

Le mix énergétique d'un État est souvent représenté par le bilan des énergies primaires⁽¹⁾ consommées (mix primaire).

Un premier constat indique que les conditions économiques voisines des pays européens n'ont pas conduit aujourd'hui à des structures de mix proches (figure 1).



P.-F. Grosjean/CEA

Pour se soustraire à sa dépendance aux énergies fossiles, la France doit entamer une transition énergétique reposant, dans une logique de sobriété et d'efficacité énergétiques, sur une synergie entre l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables. Le CEA y travaille activement. La R&D sur les réacteurs nucléaires du futur est donc incontournable, afin de concevoir des réacteurs de 4^e génération qui consommeront l'uranium appauvri alors présent sur le territoire français et le plutonium issu du combustible utilisé des centrales actuelles, alimentant ainsi le parc pendant potentiellement jusqu'à plus de 5000 ans sans importer de nouveaux combustibles. Ici, réglage des vannes dans l'installation IRINA, située au Centre CEA de Cadarache, pour des essais sodium.

(1) Énergie primaire : énergie utilisable avant toute transformation. Il s'agit des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, géothermie, énergie marémotrice, biomasse) et des déchets.

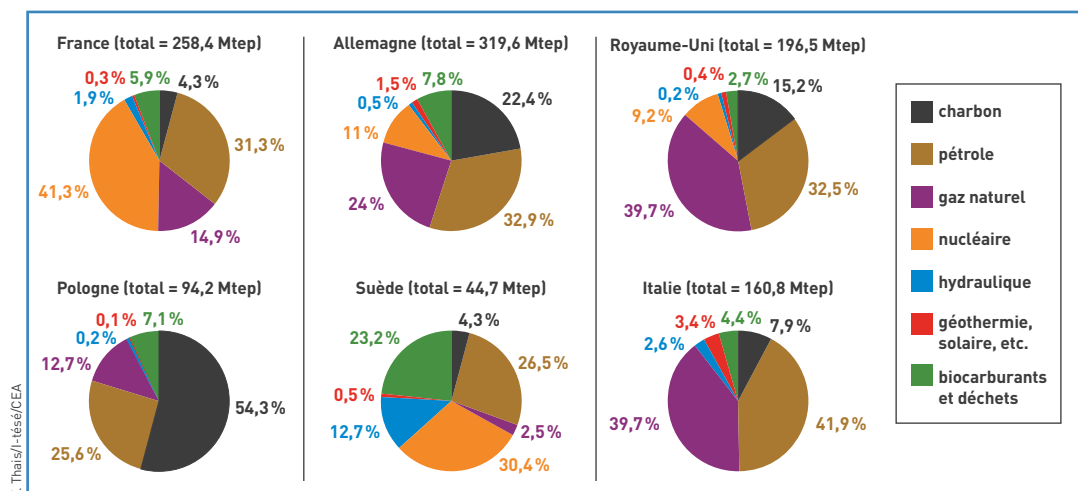


Figure 1. Mix énergétiques primaires de plusieurs pays européens par type d'énergie en 2009 (source : Agence internationale de l'énergie AIE). L'approvisionnement total en énergie primaire, exprimé en Mtep, ne prend pas en compte la chaleur et les échanges électriques. Les mix primaires des pays européens ont des structures très différentes. Ils restent majoritairement carbonés.

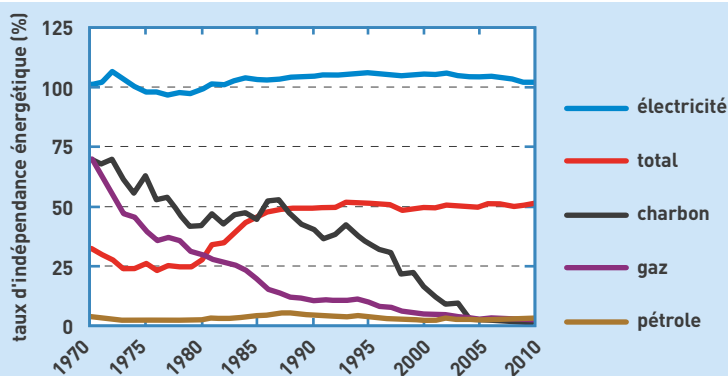


Figure 2. Évolution du taux d'indépendance énergétique français. En 2010, le taux d'indépendance énergétique (rapport entre la production nationale d'énergie primaire et la consommation primaire non corrigée des variations climatiques) s'élève à 51,2%, contre 50,3% en 2009 et 50,9% en 2008. Il bénéficie principalement de la bonne production électrique.

Bilan énergétique de la France pour 2010, Commissariat général au développement durable, Service de l'observation et des statistiques (SOeS), 2011.

Il faut en déduire que les objectifs énergétiques eux-mêmes restent très liés aux spécificités des pays, même si une ébauche de convergence s'est fait jour *via* le **paquet Énergie-Climat**.

Un second constat porte sur le caractère encore très carboné des mix, y compris en France. Ainsi, la consommation totale d'énergie primaire française s'est montée à 265,8 Mtep en 2010, dont 43 % provenaient de l'électricité primaire⁽²⁾ d'origine nucléaire, 31 % du pétrole, 15 % du gaz naturel, 7 % des énergies renouvelables (EnR) et des déchets, et 4 % du charbon. La consommation finale⁽³⁾ s'est quant à elle élevée à 170 Mtep.

Trente-cinq pour cent du mix primaire français sont consommés par le secteur énergétique. Si l'on exclut les 5 % utilisés pour des usages non énergétiques (industrie chimique, **naphtha** pour les plastiques, **bitumes** pour les routes...), le reste (rapporté à 100 %) se répartit de la manière suivante : 43 % dans le résidentiel-tertiaire, 32 % dans les transports, 22 % dans l'industrie et 3 % dans l'agriculture.

L'électricité finale est produite par le nucléaire (75 %), les EnR (14 %, principalement hydraulique) et les **énergies fossiles** (11 %).

Au cours des 20 dernières années, un fléchissement graduel dans la croissance de la consommation finale d'énergie a été observé : alors que sa progression était en moyenne de 4 Mtep par an pendant les années quatre-vingt-dix, elle a été de 2 Mtep en 2001 et 2002. Elle s'est ensuite stabilisée puis a nettement décroché en 2009.

Ces évolutions structurelles se sont accompagnées d'une amélioration très notable de l'indépendance énergétique à partir des années 1980, avec la montée en puissance du parc nucléaire (figure 2).

Les critères d'évaluation des mix énergétiques

Malgré un secteur électrique très peu carboné (voir *Énergie électrique et émissions de CO₂*, p. 11), le mix énergétique de notre pays est donc fortement dépendant des énergies fossiles. Il présente deux caractéristiques majeures : l'émission d'une quantité importante de GES (plus de 5 tonnes/habitant et par an, contre 4,3 tonnes en moyenne mondiale) et l'obligation d'importer massivement des produits énergétiques, la France en étant quasiment dépourvue, EnR exceptées. Notre facture énergétique était ainsi en 2011 de 62 milliards d'euros, chiffre à rapprocher de celui du déficit commercial, de 70 milliards d'euros.

Ce constat contient en lui-même deux des principaux

critères d'évaluation du mix dans notre pays : les émissions de GES et la maîtrise des importations. Un consensus assez large réunit l'ensemble des parties prenantes dans l'identification de l'ensemble de ces critères. La Commission Énergies 2050⁽⁴⁾, qui a récemment étudié cette question pour le compte du Gouvernement, disposait d'une grille comportant les critères suivants :

- réduction de nos émissions de GES ;
- maîtrise des importations et garantie de la sécurité d'approvisionnement du pays ;
- faisabilité (technologies réalistes à une date donnée, investissements finançables) ;
- renforcement de notre compétitivité (moindre coût complet de production de l'électricité, lequel a un impact sur le PIB – produit intérieur brut –, les emplois, la compétitivité des industries fortement consommatrices d'électricité...) ;
- flexibilité, y compris vis-à-vis des différentes options technologiques ;
- acceptabilité sociale (**hydrocarbures** liquides, **gaz de schiste**, nucléaire...).

En toile de fond, la durabilité d'un mix est une question centrale. Nombre de ces critères s'y rapportent.

Les incertitudes : du mix idéal au mix objectif

La conduite d'une politique visant le mix idéal est et sera confrontée à un certain nombre de défis et d'incertitudes portant sur :

- les prix mondiaux des énergies et la géopolitique des ressources ;
- la conjoncture économique mondiale ;
- les accidents énergétiques ;
- l'évolution des technologies (gaz et pétrole de schistes, stockage de l'énergie, captage et stockage du carbone) ;
- l'évolution des opinions publiques en regard des questions énergétiques ;
- le niveau de réussite des nouvelles stratégies énergétiques (en Allemagne notamment).

L'ordre des critères précédents et la sensibilité à ces incertitudes induisent de nombreuses différences dans la façon d'évaluer les mix possibles et par conséquent de tenter de définir un mix idéal ou simplement optimal. En effet, les préférences varient de manière importante selon les pays, les groupes d'individus, les localisations (ville ou campagne), les niveaux de développement (pays du Nord et du Sud), les ressources domestiques (disponibilités en gaz, **uranium**...), les aléas de l'Histoire (Allemagne de l'Ouest et de l'Est)... Il n'y a donc pas de fonction mathématique unique du bien-être à maximiser : pas de préférences identiques et pas de pondérations toujours claires entre ces préférences, ni dans l'espace, ni dans le temps.

(2) Électricité primaire : électricité produite par les énergies primaires.

(3) Consommation finale d'énergie : ensemble des consommations d'énergie par les utilisateurs finaux (résidentiel-tertiaire, transports, industrie, agriculture...). Elle est égale à la consommation d'énergie primaire moins la consommation d'énergie nécessaire à la transformation des énergies primaires en produits énergétiques utilisables par les consommateurs finaux.

(4) Commission Énergies 2050 : elle a été mise en place en octobre 2011 par Éric Besson, alors ministre chargé de l'Industrie, de l'Énergie et de l'Économie numérique « afin de mener une analyse des différents scénarios possibles de politique énergétique pour la France à l'horizon 2050. »



G. Rolles/REA

Le bâtiment et les transports, deux grands secteurs consommateurs d'énergies fossiles en France et à l'origine de plus de 50 % des émissions de gaz carbonique (CO₂), sont des cibles privilégiées pour le développement des énergies renouvelables. L'intégration de l'énergie solaire dans le bâtiment est un des axes forts du CEA. Ici, maison basse consommation installée sur la plateforme expérimentale Incas du site **Inc** à Chambéry (Savoie). Elle est équipée de panneaux solaires photovoltaïques et thermiques ainsi que d'un système de gestion de l'énergie locale.

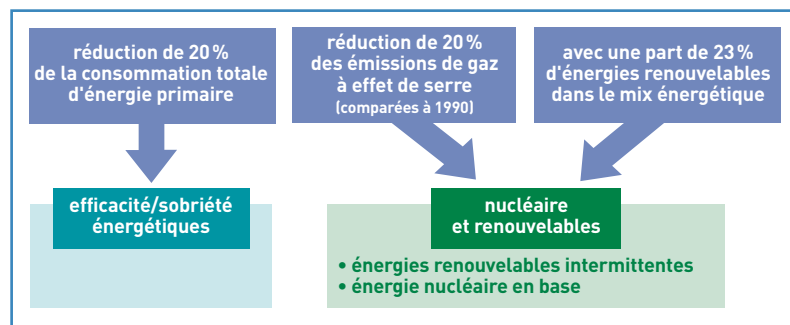
En sus de ces critères, il importe de considérer la flexibilité et la robustesse, pourtant souvent mal appréhendées. L'assurance d'une bonne résistance aux chocs, parfois appelée résilience, est un autre paramètre pris en considération dans les politiques énergétiques. Elle peut conduire à des choix particuliers non seulement en termes de diversification, de structure d'approvisionnement et de technologies des systèmes énergétiques, mais aussi en termes de R&D, de façon à disposer, le moment venu, d'une large palette de technologies et de compétences nationales ou européennes. Enfin et surtout, il ne peut y avoir de mix énergétique idéal *in abstracto*, car l'énergie n'est pas la première question à laquelle nos sociétés s'efforcent d'apporter une réponse. Ainsi, la recherche du mix idéal doit-elle se comprendre, à un moment et en un lieu donnés, comme celle d'un chemin vers un mix objectif, une cible mouvante et souvent nimbée de flou... pour rester flexible. Le concept de mix idéal/objectif européen n'est pas pour demain !

Quel mix idéal/objectif pour la France ?

Le mix idéal/objectif est un concept utile pour guider les efforts de la nation à long terme. Les démarches des experts se structurent en fait selon une double dynamique. D'ici vingt ans (les mix de 2030), il s'agira de faire au mieux avec les technologies existantes ou celles qui en seront directement dérivées, tant les temps des systèmes énergétiques sont longs. D'ici quarante ans (les mix de 2050), les technologies auront fortement évolué et le système socio-économique aura pu se transformer en profondeur.

Le mix idéal n'est pas un concept prescriptif dans notre pays. Toutefois, de nombreux engagements s'inscrivent exactement dans cette philosophie. Il s'agit en particulier de ceux qui déclinent les objectifs européens dans le cadre de la lutte contre les émissions de GES. Ils sont généralement bien connus (figure 3). Rappelons simplement qu'ils se structurent justement en objectifs pour 2020 (la règle des 3 x 20 du paquet Énergie-Climat) et pour 2050 (réduire d'un facteur 4 les émissions de GES).

En découle un ensemble d'objectifs (tels ceux de la Programmation pluriannuelle des investissements de production électrique), d'instruments de politique



CEA

économique (subventions, taxes, tarifs d'achats...) et de règles et normes qui cadrent ces objectifs. Des simulations sont conduites par des instituts spécialisés pour illustrer des trajectoires possibles, conformes à la volonté publique (figure 4). Elles restent cependant tendancielle. La démarche suivie par les Pouvoirs publics consiste à établir un cadre économique au sein duquel les agents font leurs choix, conformément aux règles économiques de l'Union européenne. Néanmoins, cette démarche considère dans certains cas des objectifs quantitatifs (parcs éoliens et solaires en MW, contribution des biocarburants en %...) et vise à mettre en place des instruments pour amener l'économie à converger vers les valeurs spécifiées. Ces objectifs sont déclinés par source d'énergie et par secteur :

- dans tous les secteurs, diminuer tant que faire se peut la quantité totale d'énergie consommée (efficacité, sobriété, substitutions), maximiser la part des énergies domestiques et décarboner le mix ;
- dans le secteur électrique, augmenter la part des EnR et de la **cogénération** pour la part qui fait appel aux combustibles fossiles qui doivent décroître en volume ;
- dans les transports, baisser les consommations, accroître la part des biocarburants de 2^e et à terme 3^e générations, électrifier le parc et prendre en compte la question de l'hydrogène, qui revient sur le devant de la scène depuis peu ;
- dans le résidentiel-tertiaire, recourir de manière plus importante aux EnR décentralisées, isoler, rénover, mieux construire le bâtiment, piloter et réguler les consommations, et remplacer les modes de chauffage anciens par des systèmes plus performants comme les pompes à chaleur ;
- dans l'industrie, promouvoir l'efficacité, substituer les énergies les moins performantes...

Compte tenu du poids relatif de ces secteurs dans la consommation d'énergie, ce sont principalement les transports (70 % de la consommation énergétique des produits pétroliers) et le résidentiel-tertiaire qu'il convient de décarboner. Le secteur de l'électricité, qui fait l'objet d'une grande attention, possède un niveau de performance excellent, dû à la place du nucléaire et de l'hydraulique.

Au final, très peu d'études montrent que le mix du futur ne peut être vu comme un gâteau énergétique de taille donnée que les énergies primaires se partageraient ensuite. Cette vision est souvent implicite dans les débats sur les parts respectives des énergies bas carbone dans l'électricité. C'est une double erreur car, d'une part, la production d'électricité peut être d'autant plus forte qu'elle contribue à décarboner des secteurs tels que les transports ou l'industrie et, d'autre part, les synergies entre énergies décarbonées créent de la valeur lorsqu'elles sont développées conjointement.

Figure 3. Les grands objectifs français d'évolution du mix énergétique. Une énergie en base fonctionne toute l'année.



© PhotoDisc

Le secteur des transports, qui dépend à 95 % du pétrole, est également une cible privilégiée pour accroître la part des énergies renouvelables. Le CEA travaille notamment sur les biocarburants de 2^e et 3^e générations. Un pilote préindustriel de production de biocarburants de 2^e génération, à partir de biomasse ligno-cellulosique (résidus forestiers, déchets agricoles), est en cours de développement (projet Syndièse). Il pourrait fournir plus de 30 millions de litres de biocarburants par an.

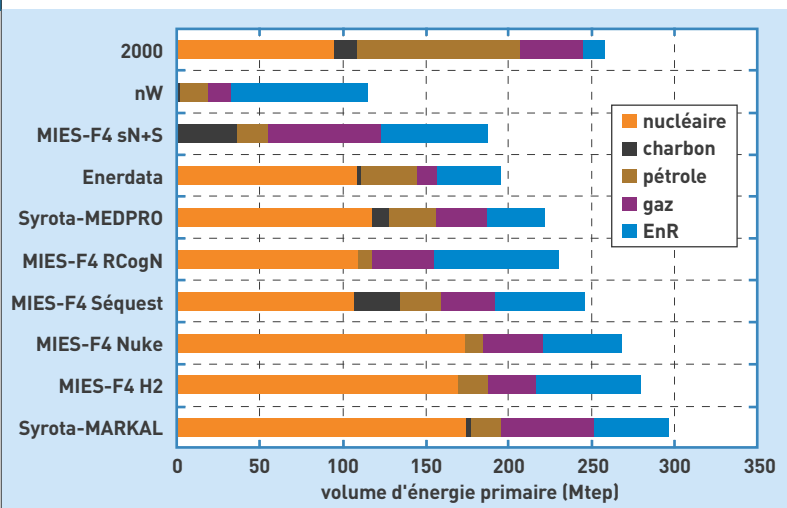


Figure 4.
Le mix énergétique primaire français en 2050 selon différents scénarios, avec un objectif de division par 4 des émissions de GES :

- 2000 : situation du mix en 2000.
- nW : scénario établi par négaWatt pour le Gouvernement en 2006, basé sur le non-renouvellement des centrales nucléaires, la sobriété et l'efficacité énergétiques, et le déploiement des EnR.
- MIES : exercice mené par Pierre Radanne pour la Mission interministérielle sur l'effet de serre (MIES) en 2004, selon cinq scénarios. MIES-F4 sN+S : sortie du nucléaire avec séquestration du gaz carbonique (CO₂) ; MIES-F4 RCogN : équilibre entre le recours au nucléaire et le développement de la cogénération et des EnR ; MIES-F4 Séquest : développement de la séquestration du CO₂ ; MIES-F4 Nuke : développement accru du nucléaire et pénétration de l'électricité dans tous les usages, y compris les transports ; MIES-F4 H2 : mise au point d'une filière hydrogène alimentée par des centrales nucléaires.
- Enerdata : dans ce scénario établi par Enerdata pour le Gouvernement en 2005, les émissions continuent de croître jusqu'en 2030 puis décroissent d'autant plus par la suite. Cette étude illustre une trajectoire post-Grenelle.
- Syrota-MEDPRO et Syrota-MARKAL : étude remise au Gouvernement en 2007 par une commission du Centre d'analyse stratégique présidée par Jean Syrota, s'appuyant sur les modèles MedPro (couplé à POLES) et Markal-Times.

La figure 4 présente les tendances traduites par divers exercices de modélisation visant au respect de l'objectif «facteur 4» par la France en 2050⁽⁵⁾. Ces scénarios indiquent que des chemins assez contrastés peuvent permettre d'atteindre les buts fixés, ceci sous contrainte de la technologie disponible et des

comportements des agents économiques, principalement. Encore faut-il aussi que ces scénarios soient économiquement acceptables.

Le rôle central de la R&D

Dans les conclusions de son rapport⁽⁶⁾, rendu en février 2012, la Commission Énergies 2050 pointe le rôle de la R&D dans l'évolution du mix énergétique français. Selon cette commission, il est impératif de se donner, grâce à la R&D, des marges de manœuvre pour des technologies qui deviendront matures à partir de 2030. L'une des clés du succès réside dans la mise au point de nouvelles filières d'excellence et la préservation de celles qui sont fortes aujourd'hui. La R&D et la formation constituent deux autres clés. La R&D apparaît donc comme une voie essentielle, pour des raisons qui vont de la disponibilité opérationnelle de nouvelles technologies à l'importance stratégique, pour le pays et l'Europe, de développer en propre des technologies innovantes, porteuses de croissance et d'emplois (figure 5).

Ces préoccupations sont au cœur des recherches du CEA dans le domaine de l'énergie. Ses travaux de R&D sont en effet presque exclusivement tournés vers des technologies non fossiles, telles que l'énergie nucléaire, l'énergie solaire ou encore l'utilisation de la biomasse et les techniques de l'hydrogène, sans oublier le stockage de l'énergie et la gestion des réseaux.

L'action du CEA consiste ainsi à tracer la route d'un futur décarboné de façon ouverte, avec un objectif très ambitieux pour les décennies 2030-2050, voire au-delà avec la fusion en complément du nucléaire de 4^e génération. Elle s'inscrit dans une vision du système énergétique global, en déployant des moyens importants

(5) Sandrine MATHY, Meike FINK et Ruben BIBAS, « Quel rôle pour les scénarios Facteur 4 dans la construction de la décision publique? », *Développement durable et territoire*, Vol. 2, n° 1, 2011. Téléchargeable à l'adresse : <http://www.imaclim.centre-cired.fr/IMG/pdf/20110924-MathyFinkBibas-RoleF4ScenariosInPublicDecisionMaking.pdf>.

(6) Jacques PERCEBOIS et Claude MANDIL, « Rapport énergies 2050 », 2012. Téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www.strategie.gouv.fr/content/rapport-energies-2050>.

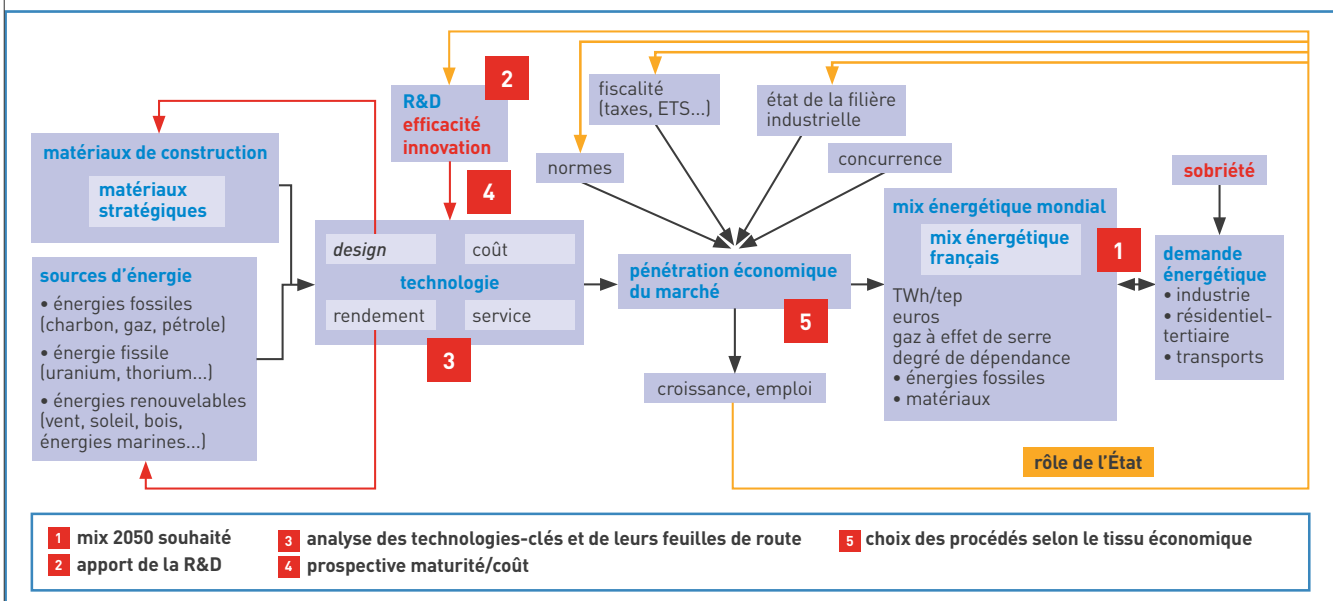


Figure 5.
Interrelations entre R&D et mix énergétiques. Ce schéma présente le rôle de la R&D dans le processus d'élaboration du mix du futur. Elle se situe à la racine des évolutions technologiques du système énergétique et compte aussi pour partie au rang des leviers dont disposent les Pouvoirs publics pour promouvoir la progression vers le mix objectif souhaité.

en soutien à la maîtrise de la demande d'énergie et à la gestion des flux et de l'information (conduite de procédés, smart grid...). Elle permet enfin de tirer avantage des synergies possibles entre les différentes énergies bas carbone, en particulier le nucléaire et les EnR : gestion de l'intermittence, optimisation des stockages *via* l'hydrogène ou les biocarburants, amélioration du cycle de vie du solaire **photovoltaïque** grâce à un raffinage du **silicium** des **cellules** par électricité nucléaire... Si le rôle de la R&D est largement reconnu, sa quantification demeure néanmoins l'un des grands défis de cette période. Des travaux bénéficiant de nouveaux modèles sont en cours. Ils n'ont pas encore délivré tout leur potentiel.

Une indispensable évaluation économique des choix énergétiques

La durabilité évoquée précédemment comprend un fort axe économique. Une technologie n'aura de chance de se développer que si son coût devient à terme suffisamment bas pour être accepté à tous les niveaux de la société, que ce soit directement, en minimisant les charges des ménages et des entreprises, ou de façon indirecte, en minimisant l'impact sur la balance commerciale du pays. En prenant en considération le coût de l'électricité (par exemple en **MWh**), il apparaît que ce dernier varie de manière importante selon le scénario de mix électrique choisi (figure 6).

L'importance de l'évaluation technico-économique a amené le CEA à créer l'Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (I-tésé). Cet institut dédié dispose de la capacité de construire et d'évaluer des mix contrastés, dans une perspective de court et surtout de moyen et long termes. Un de ses axes prioritaires est une meilleure prise en compte du rôle de la R&D dans l'élaboration puis dans l'atteinte du jeu de mix idéaux/objectifs du pays.

Le débat national sur la transition énergétique mis en place par le Gouvernement, qui a fait suite à la première Conférence environnementale des 14 et 15 septembre 2012, a été lancé le 29 novembre 2012.

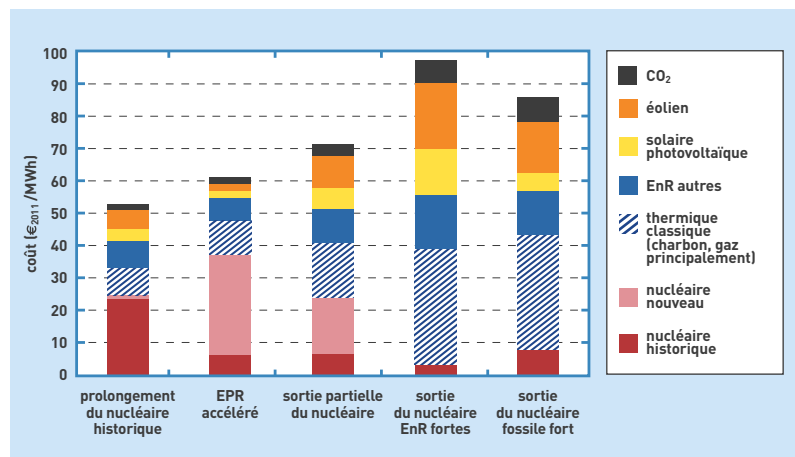


Figure 6.

Cet exemple, emprunté au rapport de la Commission Énergies 2050⁽⁶⁾, illustre une des logiques constitutives des choix de mix par les Pouvoirs publics. Divers scénarios de mix électrique en 2030, pour un environnement économique donné, ont été évalués. Le critère pris en compte est celui du coût moyen **actualisé** du MWh produit. Pour le gaz carbonique (CO₂), le coût de la taxe ou d'ETS (*European Union Emissions Trading System*) s'élève à 50 euros par tonne. Le rapport entre les coûts du MWh est presque de 2 entre le choix de prolonger la durée d'exploitation du nucléaire historique et celui de développer un parc fortement constitué de technologies bas carbone, sans le nucléaire. Les choix comme la dynamique jouent un rôle central : l'arrêt rapide des réacteurs nucléaires actuels ne permet, dans ce scénario, ni de tirer avantage d'EnR compétitives, car le renouvellement a lieu trop tôt, ni de bénéficier massivement de synergies entre EnR et énergie nucléaire, cette dernière n'étant plus utilisée.

Il a été structuré en trois étapes : une phase d'information, une phase de consultation du grand public « au plus près des citoyens » qui se déroulera jusqu'en juin 2013, une phase de synthèse et d'élaboration de recommandations qui aboutira à un projet de loi de programmation à l'automne 2013. Dans le cadre de l'**Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (Ancre)**, les experts du CEA ont pour mission de proposer et de caractériser des scénarios sur les trajectoires possibles pour la transition énergétique.

> Jean-Guy Devezeaux de Lavergne

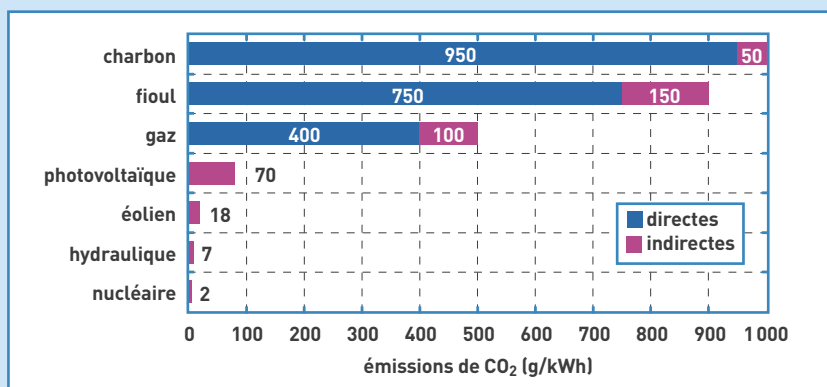
Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (I-tésé)
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay

Énergie électrique et émissions de CO₂

Le secteur de l'électricité est, avec les transports, l'un des grands émetteurs de gaz à effet de serre (GES) dans le monde. Les centrales à charbon sont les plus polluantes

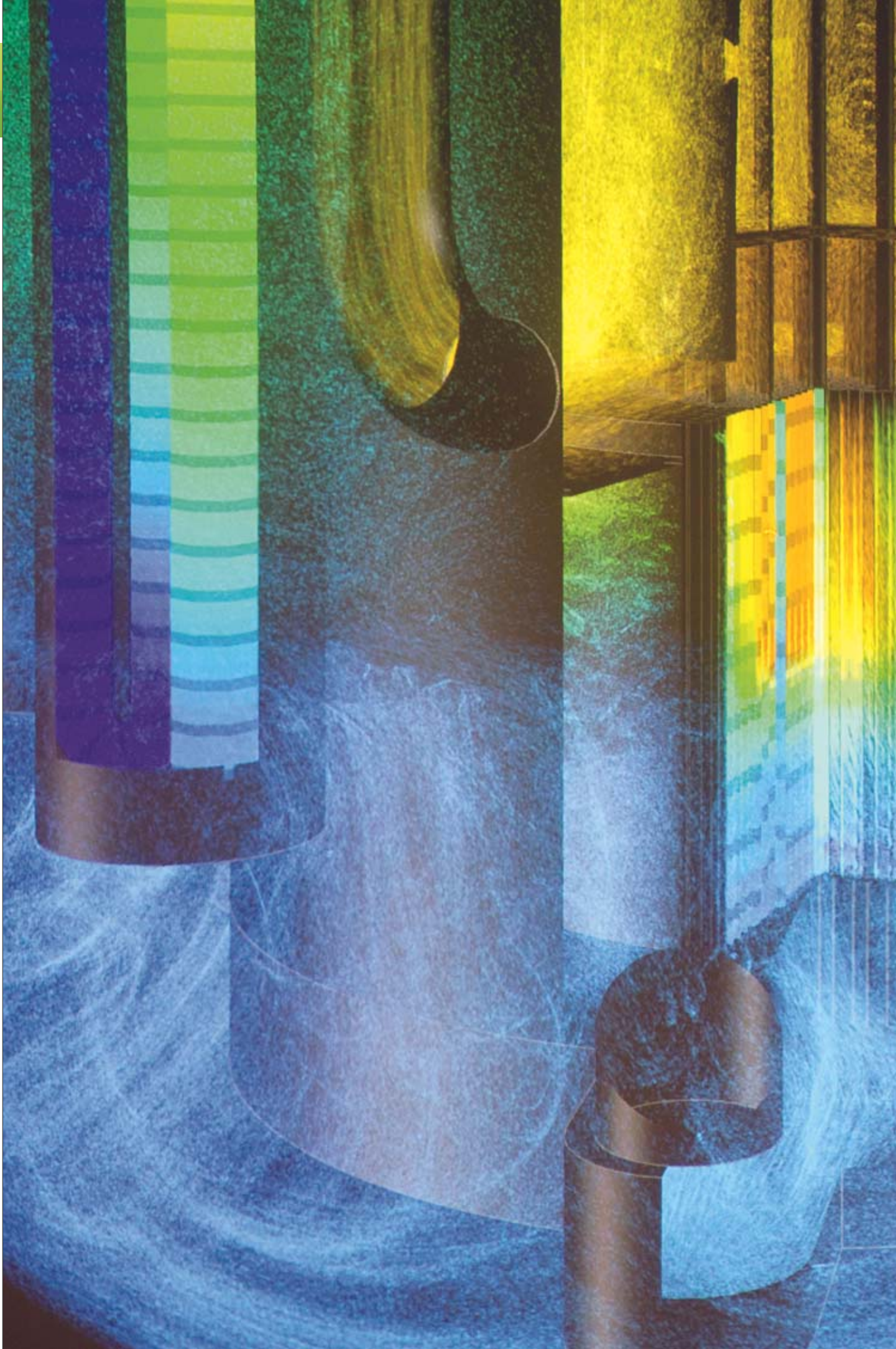
avec 1 kg de gaz carbonique (CO₂) par **kWh** produit, deux fois plus que le gaz, communément utilisé en **cogénération**. Alors que le nucléaire et les énergies renouvelables

n'émettent pas de CO₂ en fonctionnement, une analyse de leur cycle de vie montre qu'ils consomment de l'énergie, principalement au cours de la phase de construction. Les émissions, dites indirectes, sont évaluées et ramenées à la production électrique fournie tout au long de la durée de vie de la centrale. En France, le secteur de l'électricité est peu carboné grâce à une production essentiellement à partir d'énergie nucléaire (à 75 % ; émission de 2g/kWh de CO₂) et d'énergies renouvelables (à 14 % ; émission de 7g/kWh de CO₂ pour l'hydraulique par exemple).



> Henri Safa

Direction scientifique
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay



I. PRODUCTION DE L'ÉNERGIE

Après la loi de programme fixant les orientations énergétiques de 2005, les lois d'application du Grenelle de l'environnement et le plan d'action « Paquet Énergie-Climat » adopté début 2008 par la Commission européenne, la France s'est engagée dans un nouveau débat sur la transition énergétique, qui aboutira à une loi de programmation de la transition énergétique à l'automne 2013. Si les économies d'énergie demeurent un axe fort de la politique énergétique, les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire restent au cœur d'un parc électrique à bas carbone avec une amplification de la diversification amorcée en 2005. Les mesures incitatives au développement du solaire photovoltaïque et de l'éolien témoignent de la volonté des Pouvoirs publics de progresser vers l'objectif de 23 % d'électricité par les énergies renouvelables en 2020. S'y ajoute l'objectif d'une part de 10 % de biocarburants dans les fournitures d'essence et de diesel en 2015. La filière nucléaire, remise en question dans certains pays voisins suite à l'accident de la centrale de Fukushima, ressort confortée en France avec une part ramenée à 50 % dans la production d'électricité en 2025. L'ensemble de ces orientations contribue à réduire notre dépendance vis-à-vis des énergies fossiles importées et donc le déficit de notre balance commerciale. Quels sont plus précisément les axes de recherche sur les principales filières énergétiques ? Pour l'énergie solaire, il s'agit d'améliorer le rendement des cellules photovoltaïques, de diminuer leur coût et de développer les perspectives ouvertes par le solaire à concentration thermodynamique pour la production d'électricité à haut rendement ou de chaleur à haute température pour l'industrie. Pour la biomasse, un premier défi est porté par les démonstrateurs BioTfuel et Syndièse, avec le développement de procédés de 2^e génération capables de convertir en diesel et kérosène des matières végétales sans usage, éventuellement additionnées de résidus pétroliers. Un autre défi consiste à progresser vers des biocarburants de 3^e génération en renforçant l'aptitude de microalgues à produire de l'hydrogène ou des composés carbonés énergétiques. Pour le nucléaire à fission, les enjeux sont d'intégrer les enseignements de l'accident de Fukushima dans l'optimisation continue des réacteurs en sûreté et compétitivité économique, et de préparer, avec le démonstrateur technologique ASTRID, l'avènement d'une nouvelle génération de réacteurs à neutrons rapides dans une optique de nucléaire durable, économe en uranium et en besoins de stockage pour les déchets radioactifs ultimes. Enfin, pour le nucléaire à fusion, il s'agit de démontrer la maîtrise d'un plasma thermonucléaire dans ITER, puis la production de puissance dans un réacteur de démonstration et d'aboutir, dans le dernier quart du XXI^e siècle, à un premier réacteur de puissance. Toutes ces recherches s'accompagneront d'études et de développements technologiques transverses pour tirer le meilleur parti de chaque filière et pour optimiser leur interfaçage. Comme le montrent les articles qui suivent, le CEA y prend une part très active et participe également aux études technico-économiques permettant d'évaluer la viabilité de ces filières dans un système de production d'énergie global capable de satisfaire l'ensemble des besoins.

► **Frank Carré**

Direction scientifique
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay



Le nucléaire après Fukushima

L'accident de Fukushima survenu au Japon a fait resurgir nombre de craintes relatives au nucléaire. Alors que certains pays, comme l'Allemagne et l'Italie, ont annoncé leur sortie du nucléaire et que le Japon, dont la quasi-totalité des réacteurs sont aujourd'hui à l'arrêt, n'a pas encore pris de décision, d'autres pays tablent toujours sur le nucléaire pour asseoir leur indépendance énergétique et atteindre les objectifs de diminution des émissions de gaz à effet de serre. **La prise en compte des enseignements tirés de Fukushima se traduit par un renforcement de la sûreté** des centrales en fonctionnement, des évaluations de leur résistance dans des situations extrêmes, le choix de la 3^e génération pour les réacteurs à construire et une amélioration des performances, notamment en matière de sûreté, permise par les nouvelles technologies mises en œuvre dans la conception des réacteurs de 4^e génération.



L. Bonaventure/AFP/CEA

Vue de la piscine et du réacteur de recherche Osiris (centre CEA de Saclay). Suite à l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima au Japon, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a été chargée d'effectuer une évaluation complémentaire de sûreté (ECS) des 150 installations nucléaires françaises, dont celles exploitées par le CEA. L'objectif de ces ECS est de déterminer les marges de résistance des installations face aux agressions extrêmes et si des améliorations sont nécessaires. À cet effet, le CEA a mis en place une organisation spécifique comprenant un comité de pilotage, un comité de lecture, deux groupes de travail, «aléas» et «équipements», ainsi que des groupes de rédaction. L'ECS du réacteur Osiris a été réalisée en 2011. Dans son rapport, paru en décembre de la même année, l'ASN conclut : «Pour le réacteur Osiris du CEA-Saclay, en cas de perte totale de refroidissement et de perte totale des sources électriques, les délais avant fusion du cœur sont importants et compatibles avec l'acheminement de moyens de secours extérieurs».

Le 11 mars 2011, un puissant séisme de magnitude 9 secoue le nord-est du Japon, puis un tsunami haut de plus de 10 mètres dévaste la côte, déclenchant le troisième accident nucléaire majeur de l'histoire après Three Mile Island (1979, États-Unis) et Tchernobyl (1986, Ukraine). Rapidement, l'onde de choc dépasse l'archipel japonais et relance un peu partout la critique anti-nucléaire. Les prises de position radicales se multiplient. Par exemple, on peut lire le 24 mai : «le nucléaire est mort» (Jeremy Rifkin, président de la **Foundation on Economic Trends**) et «Fukushima ne remet pas en cause le nucléaire»

(Henri Proglio, PDG d'EDF). Pourtant, personne n'est encore capable de mesurer de façon précise les dommages de l'accident. S'il est proprement impossible d'en lister toutes les conséquences, il est probable que certaines d'entre elles resteront visibles pendant des décennies. Ainsi y aura-t-il un avant et un après Fukushima.

L'avant Fukushima

Début 2011, selon les données de l'**Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)**, 441 réacteurs nucléaires étaient opérationnels dans le monde, soit une puissance nette installée de 374 **GWe**. Les centrales nucléaires produisaient annuellement 2,7 milliards de **MWh**, soit plus de 13 % de l'électricité de la planète⁽¹⁾. Une contribution à comparer à celles des combustibles **fossiles** (67 %) et des énergies renouvelables (20 %, dont 16 % pour la seule énergie hydraulique).

■ (1) Statistiques 2009 de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).



2011 DigitalGlobe/Getty Images

Image satellite du site de Fukushima Dai-ichi (Japon), prise le 18 mars 2011, après le séisme et le tsunami d'une ampleur exceptionnelle survenus le 11 mars.

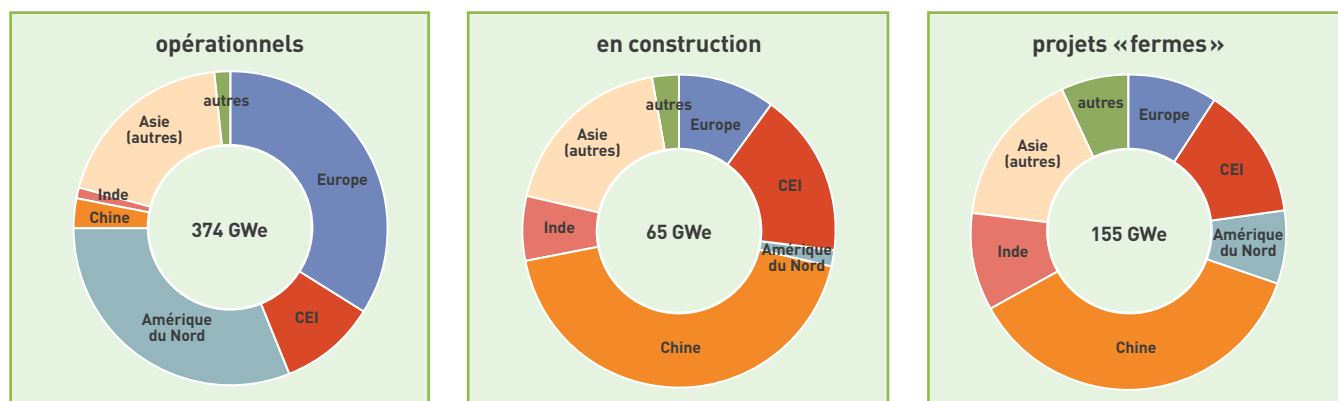


Figure. Répartition des centrales en construction et projetées en 2011. Début 2011, avant l'accident de Fukushima, de nombreux pays avaient manifesté une volonté politique de s'engager dans la production d'électricité nucléaire, d'où une profonde évolution de la répartition géographique des nouvelles unités par rapport à celle des réacteurs opérationnels. Alors que ces derniers se situaient pour l'essentiel en Europe, en Amérique du Nord et en Extrême-Orient (Japon, Corée du Sud), la majorité des nouvelles centrales se construisaient ou devaient se construire dans les pays émergents, en Chine, en Inde et en Russie. La CEI (Communauté des états indépendants) se compose de 11 des 15 anciennes républiques soviétiques, l'Estonie, la Lettonie, la Lituanie et la Géorgie n'en faisant pas ou plus partie.

Sous l'effet conjugué de l'augmentation de la demande énergétique mondiale et de la volonté de réduire les émissions de gaz carbonique (CO₂), la relance de la filière nucléaire était présentée comme une évidence. En témoignent les 68 unités alors en construction et les quelque 450-500 réacteurs prévus ou proposés de par le monde, même s'il convient de considérer avec prudence les réacteurs proposés qui ne correspondaient généralement qu'à des déclarations d'intention d'autorités nationales. Beaucoup de pays avaient en effet manifesté une volonté politique de s'engager dans la production d'électricité nucléaire, entraînant de fait une profonde évolution de la répartition géographique des nouvelles unités par rapport à celle des réacteurs opérationnels (figure).

Cependant, cette renaissance du nucléaire, associée à un besoin de production d'énergie à bas coûts, n'allait pas sans poser des questions relatives au cadre réglementaire et aux normes de sûreté accompagnant le développement de ces nouvelles centrales. Étaient principalement concernées les centrales « bas de gamme », sur lesquelles commençaient à se positionner les industriels des pays émergents et dont les caractéristiques permettaient de casser les prix sans offrir autant de garanties en matière de sûreté.

L'après Fukushima

Pour l'heure, et en adoptant un point de vue purement factuel, l'accident de Fukushima aura entraîné :

- l'arrêt définitif de 12 réacteurs : les 4 réacteurs japonais accidentés et 8 réacteurs allemands, totalisant



La centrale nucléaire de Biblis (Hesse), en Allemagne. À la suite de l'accident de Fukushima, l'Allemagne a définitivement arrêté 8 réacteurs et décidé de sortir du nucléaire d'ici 2022. Les deux réacteurs de la centrale de Biblis, qui délivraient une puissance de 2,4 GWe, ont été fermés le 18 mars 2011.

une capacité de 11 GWe, soit 3 % de la capacité nucléaire mondiale ;

- l'arrêt prolongé de la quasi-totalité des réacteurs du Japon représentant plus de 40 GWe, soit plus de 10 % de la capacité nucléaire mondiale. Aucune date de redémarrage n'est encore connue ;

- une quasi-interruption de la mise en construction de nouveaux réacteurs. En 2011 et 2012, seulement 7 tranches (totalisant moins de 6 GWe) ont été lancées sur la quarantaine d'unités programmées (environ 45 GWe). Les projets chinois ainsi différés représentent à eux seuls plus de 20 GWe ;

- un ralentissement très net de la mise en service de nouvelles tranches en 2011 et 2012 : 9 réacteurs (6 GWe) au lieu des 22 unités prévues (20 GWe).

Les déclarations officielles

Dans les mois qui ont suivi l'accident, plusieurs pays européens ont annoncé leur volonté de ne plus faire appel au nucléaire.

C'est le cas de l'Allemagne, avec la décision prise le 30 juin 2011 par le Gouvernement fédéral d'arrêter d'ici 2022 les 9 réacteurs encore en service (12 GWe). Cette décision consiste globalement à un retour au consensus de sortie du nucléaire qui avait été adopté en 2001 par la coalition des Sociaux-démocrates et des Verts. Il en va de même pour la Suisse, où le Gouvernement fédéral avait annoncé quelques semaines plus tôt, le 25 mai 2011, l'abandon progressif du nucléaire d'ici 2034 (5 tranches, 3,2 GWe).

En Italie, le référendum des 12 et 13 juin 2011 a prolongé la décision déjà prise en 1987, suite à un premier référendum tenu après la catastrophe de Tchernobyl. Il sonne le glas du programme d'investissement nucléaire soutenu par le Président du Conseil (13 GWe devaient être construits d'ici 2030). Enfin, en Belgique, les partis politiques participant à la formation du nouveau Gouvernement fédéral ont confirmé, en novembre 2011, le principe de sortie du nucléaire à partir de 2015 prévu dans une loi votée en 2003. Cependant, la fermeture des 7 réacteurs belges (5,8 GWe) se fera à condition que le pays trouve des sources d'énergie alternatives au nucléaire.

À l'opposé, plusieurs pays, après avoir tiré les enseignements de l'accident de la centrale de Fukushima,



ont fait part de leur volonté de poursuivre ardemment le développement d'une filière nucléaire. Ainsi, selon les déclarations de Sergéï Kirienko, Directeur général de **Rosatom**, à la conférence générale de l'AIEA à Vienne, la Russie « continuera de développer le nucléaire civil ». La Chine pourrait délivrer les autorisations pour de nouveaux projets en 2013, après les avoir gelées à la suite de l'accident, le temps d'inspecter les installations du pays. L'Inde continue quant à elle à considérer l'énergie nucléaire comme une composante essentielle de son mix énergétique, permettant de soutenir sa forte croissance. D'une manière générale, tous les pays primo-accédants déclarent maintenir leur intérêt pour cette forme d'énergie.

Le Japon connaît une situation particulière, car le pays s'est engagé à court terme dans un mouvement d'arrêt accéléré de ses réacteurs nucléaires, tant pour des raisons techniques que politiques. En septembre 2012, le Gouvernement japonais a pris position en faveur d'un objectif d'abandon des technologies nucléaires dans les trente prochaines années. En même temps, le Gouvernement conserve une logique de redémarrage de certains des réacteurs arrêtés, dès lors que leur sûreté est garantie, et a autorisé la poursuite de la construction de deux réacteurs en chantier.

Les mesures prises

Tous les pays nucléarisés disent avoir lancé des tests de vérification de la sûreté de leurs centrales à la lumière des événements de Fukushima. La 55^e Assemblée générale de l'AIEA a ainsi entériné un plan d'action visant à renforcer la sûreté des centrales en fonctionnement dans le monde, invitant les pays à accepter davantage de visites d'experts internationaux. Toutefois, sous la pression de certains pays, États-Unis et Chine notamment, la sûreté nucléaire tend à rester largement une question de souveraineté nationale.

Le **Conseil européen** des 24 et 25 mars 2011 a, de son côté, demandé que tous les réacteurs européens fassent l'objet d'une évaluation de leur résistance



G. Lesénéchal/CEA

Piscine du réacteur de recherche Cabri (centre CEA de Cadarache). Ce réacteur, conçu pour étudier les conséquences de certaines situations accidentelles sur le comportement des **combustibles** utilisés dans les centrales nucléaires, figure parmi les installations ayant fait l'objet d'une ECS en 2012. Les exploitants ont remis leurs rapports à l'ASN le 15 septembre 2012.

à des événements extraordinaires, tels que ceux survenus au Japon (séismes, inondations...), ou à d'autres situations extrêmes pouvant conduire à la perte simultanée de plusieurs fonctions de sûreté. Les résultats de ces *stress tests* (tests de résistance) ont fait l'objet d'une revue croisée sous l'égide de l'**ENSREG** (**European Nuclear Safety Regulators Group**), dont le rapport a été rendu public en avril 2012.

En France, l'**Autorité de sûreté nucléaire** (ASN) a organisé des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) qui s'inscrivent dans un double cadre : d'une part, la réalisation d'un audit de la sûreté nucléaire des installations nucléaires civiles françaises au regard des événements de Fukushima, qui a fait l'objet d'une saisine de l'ASN le 23 mars 2011 par le Premier ministre et, d'autre part, l'organisation des *stress tests* demandée par le Conseil européen. Les conclusions ont été rendues publiques au tout début 2012 après les ECS des installations traitées en priorité : « l'ASN considère que les installations examinées présentent un niveau de sûreté suffisant pour qu'elle ne demande l'arrêt immédiat d'aucune d'entre elles. Dans le même temps, l'ASN considère que la poursuite de leur exploitation nécessite d'augmenter dans les meilleurs délais, au-delà des marges de sûreté dont elles disposent déjà, leur robustesse face à des situations extrêmes ».

Le nucléaire est toujours crédible

L'accident de Fukushima est intervenu à un moment crucial, en pleine renaissance du nucléaire, tant pour la vente de nouvelles centrales que pour la prolongation de la durée de vie des réacteurs existants. Or, contrairement à l'accident de Tchernobyl, qui apparaissait comme une catastrophe liée à un système ne disposant pas des règles de sûreté et de la qualité des technologies occidentales, Fukushima a montré qu'un accident nucléaire important pouvait arriver dans un des pays parmi les plus développés du monde, particulièrement réputé pour sa sophistication technologique. Même si cet accident est le résultat de conditions tout à fait exceptionnelles, le monde a pris conscience que, malgré toutes les précautions prises, un accident jugé hautement improbable pouvait se produire. Ainsi, dans les déclarations, les avis convergent pour tirer les leçons de tels événements, dans



Le Conseil de l'Union européenne

Réunion du Conseil européen à Bruxelles des 24 et 25 mars 2011. Au cours de cette session, le Conseil européen a demandé que toutes les installations nucléaires de l'Union européenne soient vérifiées sur la base d'une évaluation globale et transparente des risques et de la sûreté (*stress tests*).

le sens d'un renforcement de la démarche d'amélioration continue de la sûreté, et pour refuser les solutions bas de gamme. Désormais, seuls les projets de **réacteurs de 3^e génération** devraient voir le jour avec, comme possible conséquence, une détérioration des avantages économiques de l'énergie nucléaire comparativement aux autres technologies de production d'électricité. D'où l'objectif annoncé par la Chine de développer une technologie de réacteurs de 3^e génération moderne, sûre et bon marché, à la fois pour son marché intérieur et pour l'exportation. Deux **EPR**, dont la mise en service est prévue pour 2014 et 2015, sont en cours de construction. Il est certain que l'accident de Fukushima ne modifie aucun des fondamentaux de la demande énergétique : le besoin croissant en électricité, la raréfaction des ressources fossiles et la nécessité de réduire les rejets de CO₂ sont totalement d'actualité. Le nucléaire reste indubitablement une réponse crédible respectant l'ensemble de ces fondamentaux. C'est pourquoi, à l'exception des quelques pays européens que nous avons cités et peut-être du Japon, la question du nucléaire à court terme ne se résumera pas à « stop ou encore ». L'heure n'est pas à la révolution énergétique, même si quelques évolutions du mix énergétique mondial sont probables. Ainsi peut-on continuer de penser que l'avenir du nucléaire restera dopé par les pays émergents, la Chine au premier rang. Si les États respectent leurs engagements en matière de lutte contre le changement climatique, il faut s'attendre à une hausse de la production électronucléaire (+ 70 % d'ici 2035 selon les estimations de l'**Agence internationale de l'énergie AIE**). Même dans ce cas, la part du nucléaire au niveau mondial resterait à-peu-près constante et relativement modeste (14 % de la production d'électricité). Néanmoins, dans son rapport annuel rendu public en novembre 2011, l'AIE a également pris en compte une hypothèse où les répercussions de l'accident de Fukushima seraient plus marquées. Ce scénario de « nucléaire faible » postule principalement qu'aucun nouveau réacteur n'est construit dans la zone **OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques)** et que les pays hors OCDE réduisent de moitié leurs projets de construction. La part du nucléaire passerait alors de 13 % actuellement à 7 % en 2035. Beaucoup d'observateurs ont jugé ce scénario trop pessimiste, même si celui-ci est avant tout destiné à mettre en garde les États contre les répercussions importantes, notamment sur le climat, que pourrait avoir un recours moindre au nucléaire civil.

Vers la 4^e génération

Au-delà des déclarations des uns et des autres, il est encore prématuré de mesurer les véritables conséquences de l'accident de Fukushima sur l'avenir du nucléaire mondial. Ce dernier reste aujourd'hui un élément fondamental du mix énergétique pour répondre au besoin croissant d'électricité tout en limitant les émissions de CO₂. Cependant, il ne faut pas sous-estimer l'impact de l'accident, tant sur les investisseurs que sur les opinions publiques et, par voie de conséquence, sur les décideurs politiques. Les exigences complémentaires de sûreté pèseront inévitablement sur le coût de production de l'électricité. Il est probable que le nucléaire restera intéressant tant



C. Abou/CEA

que les prix des combustibles fossiles s'orienteront à la hausse. Toutefois, on voit déjà que cet avantage tend à s'amenuiser là où les énergies fossiles sont meilleur marché (comme le gaz aux États-Unis). L'accident de Fukushima a fait resurgir le cortège de craintes, de mythes et de peurs qui accompagne l'utilisation de l'atome. Il suscite de nouvelles interrogations sur le risque du nucléaire civil auxquelles il est difficile de répondre, si ce n'est en annonçant des mesures allant encore plus loin dans le sens d'une sûreté maximale. Comment les dirigeants politiques feront-ils la part entre des craintes légitimes et les avantages environnementaux ou d'indépendance énergétique qu'apporte le nucléaire ? La réponse n'est pas encore totalement connue. Cet accident aura en tout cas conforté l'exigence d'une sûreté renforcée et appuyé le besoin d'intensifier les recherches en matière de sûreté nucléaire. Ainsi en France, il a été jugé important de réexaminer la méthodologie d'évaluation des effets du séisme et de l'inondation sur les installations nucléaires, d'approfondir les connaissances sur la phénoménologie des accidents graves et leurs conséquences potentielles, et d'étudier les moyens envisageables pour en atténuer les impacts. Ces événements ont rappelé toute l'importance qu'il y avait à travailler sur des technologies innovantes offrant des performances accrues en termes de sûreté, de sécurité, de fiabilité, de compétitivité économique, de gestion des déchets, d'optimisation des ressources naturelles et de résistance à la **prolifération**. C'est l'objet des études menées sur les **systèmes nucléaires de quatrième génération** (voir *ASTRID, démonstrateur technologique du nucléaire de 4^e génération*, p. 26). Dans une déclaration, le **Forum international Génération IV** a rappelé la nécessité d'accentuer les efforts sur la sûreté : « ...le forum considère comme essentiel que les systèmes de 4^e génération, dont le déploiement commercial est prévu à l'horizon 2030, correspondent au meilleur état de l'art mondial en matière de sûreté ».

L'installation Verdon. Implantée dans deux cellules chaudes du centre CEA de Cadarache, l'installation Verdon permet de porter des échantillons de combustible jusqu'à la fusion dans un four à induction sous atmosphère contrôlée pour reproduire les configurations d'accidents graves et étudier le relâchement des **produits de fission** ainsi que leur transport dans le circuit primaire d'un réacteur.

➤ **Alain Leudet et Alain Porracchia**
Direction de l'innovation
et du soutien nucléaire (DISN)
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay



S'intéresser au cycle de vie du nucléaire signifie prendre en compte non seulement celui des installations nucléaires, de la phase de conception jusqu'à celle de déconstruction, mais aussi celui des matières, de la première utilisation de l'uranium dans les réacteurs à la prise en charge des déchets. **Ces deux aspects sont partie prenante des travaux de R&D menés par le CEA depuis sa création.** Pour le combustible, ces travaux conduisent, avec les systèmes nucléaires de 4^e génération, à une réduction en volume et en toxicité des déchets ultimes, dans le cadre d'un cycle fermé où l'essentiel de la matière usée est recyclé. Quant aux installations nucléaires, le CEA, fort d'une expérience de plus de soixante ans, est à même de piloter leur assainissement et leur démantèlement, jusqu'au déclassé, dans les meilleures conditions. En témoignage, entre autres, le projet Passage qui a abouti à faire du centre CEA de Grenoble, à l'origine exclusivement dédié aux recherches sur l'atome, un centre technologique de premier plan, tourné vers les micro- et nanotechnologies, les nouvelles technologies de l'énergie et les biotechnologies.

Le cycle de vie du nucléaire

Le cycle du combustible nucléaire

Il y a plus de trente ans, la France a fait le choix pour son industrie nucléaire d'un cycle fermé, qui consiste à traiter les combustibles usés pour séparer les matières valorisables des déchets. Optimiser le cycle des matières, tel qu'il est déjà mis en œuvre de façon industrielle, préparer les options de gestion des matières pour les parcs des réacteurs futurs sont ainsi deux des axes forts des travaux du CEA. Ils sont menés dans une optique de développement d'un nucléaire durable, sûr et économiquement compétitif.



Intervention au télém manipulateur dans la Chaîne blindée procédé (CBP) de l'installation ATALANTE située au centre CEA de Marcoule. C'est dans cette chaîne blindée que la démonstration de la faisabilité technique de nombreux procédés a été réalisée, tels les procédés SANEX, DIAMEX, GANEX et EXAM.

S. Le Coustier/CEA

La gestion des matières, avant et après leur irradiation dans les réacteurs nucléaires, constitue un aspect essentiel des filières du secteur. En amont, de la mine au réacteur, il s'agit, au travers de très nombreuses transformations successives, d'extraire, de purifier et d'**enrichir** l'**uranium** (U), puis d'élaborer les **assemblages combustibles**. En aval, il faut gérer les **combustibles usés** en tenant compte tant de leur capacité énergétique, qui demeure très importante, que de leur dangerosité potentielle, car ils comprennent des éléments **radioactifs**, dont certains de très longue **période**.

Les options retenues pour le cycle du combustible, en particulier pour l'aval du cycle, sont des éléments déterminants pour la conception de systèmes nucléaires durables. Le **recyclage** des matières valorisables, **fissiles** et **fertiles**, au sein de réacteurs aptes à en tirer le meilleur parti, constitue la ligne de force des recherches menées dans ce domaine.

Le cycle des matières, tel qu'il est pratiqué aujourd'hui en France, représente un point de départ solide pour le développement de futurs systèmes nucléaires. En effet, les technologies employées conduisent non seulement à des performances remarquables, mais laissent aussi entrevoir des perspectives d'évolution très intéressantes, dans une logique de développement permettant de toujours mieux satisfaire aux impératifs d'une utilisation rationnelle et économe des ressources et à la nécessité d'une gestion sûre des **déchets ultimes**, présentant les meilleures garanties en matière de résistance à la **prolifération** et une efficacité économique encore renforcée.



Philippe Lesage/Aréva

L'amont du cycle du combustible. Après avoir été extrait de la mine (à ciel ouvert ou souterraine), le minerai d'uranium est traité afin d'obtenir du concentré d'uranium ou *yellow cake*.

Le cycle des matières

La gestion des matières mise en œuvre dans le parc nucléaire français relève d'un **cycle fermé** (figure 1). Le chargement annuel des 58 **réacteurs à eau sous pression** (REP) de l'ordre de 1 000 tonnes d'oxyde d'**uranium enrichi** (UOX) requiert environ 8 000 tonnes d'**uranium naturel** (ce qui conduit à **entreposer** près de 7 000 tonnes d'uranium appauvri). Les valeurs indiquées ci-après, exprimées en tonnes de métal lourd, doivent être considérées comme des ordres de grandeur, les conditions réelles d'exploitation pouvant varier d'une année à l'autre.

Les matières contenues dans les 1 000 tonnes d'UOX déchargées sont pour l'essentiel réutilisées. Le **plutonium** (Pu) qui est retiré des opérations de **traitement**, de l'ordre d'une dizaine de tonnes, est recyclé sous la forme de combustible MOX⁽¹⁾ dans certains réacteurs du parc (environ 120 tonnes par an). L'uranium récupéré ou URT (uranium de retraitement) – près de 950 tonnes – peut être ré-enrichi. On obtient alors d'une part, autour de 150 tonnes de combustible URE (uranium ré-enrichi), qui sont ensuite rechargées dans plusieurs réacteurs du parc et, d'autre part, de l'ordre de 800 tonnes d'URT appauvri, qui sont entreposées. Les matières restantes, **produits de fission** et **actinides mineurs** (environ 40 tonnes) constituent les déchets radioactifs ultimes. Ceux-ci sont **vitifiés** et entreposés pour **décroissance radioactive**, en attente de leur **stockage en formation géologique profonde**. À ce jour, les combustibles MOX usés et URE usés ne sont pas recyclés. Ils sont entreposés sous eau, en vue d'un traitement différé et du recyclage des matières qu'ils contiennent dans les **réacteurs de 4^e génération** à venir.

Les opérations de traitement et de recyclage des combustibles usés ont aujourd'hui atteint une pleine maturité industrielle, résultat de décennies de R&D qui ont profondément transformé la mise en œuvre du procédé PUREX⁽²⁾. Elles permettent d'atteindre des taux de recyclage très élevés (supérieurs à 99 %) tout en ne générant que très peu de déchets secondaires. Environ 25 000 tonnes de combustibles usés ont ainsi été traitées dans les usines de La Hague (Manche), et près de 2 000 tonnes de MOX ont été fabriquées.

La stratégie du cycle du combustible développée actuellement pour le parc français présente quatre grands atouts :

- une économie des ressources en uranium naturel, pouvant avoisiner les 25 % si la totalité de l'uranium et du plutonium est recyclée ;

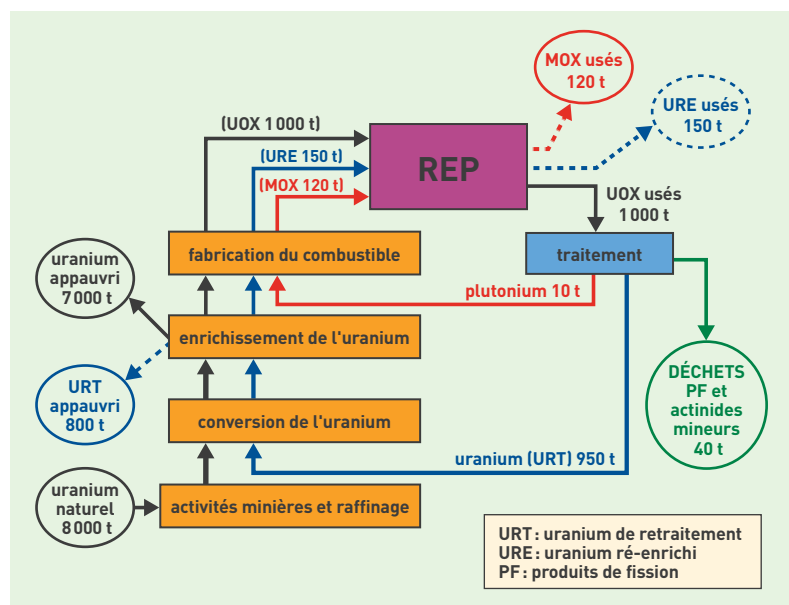


Figure 1.
Le cycle des matières dans le parc nucléaire français (en flux annuels indicatifs pour une production d'environ 400 TWh/an).

- le **conditionnement** des déchets ultimes sans plutonium, de façon sûre. Le conditionnement des produits de fission dans le **verre** est un standard international, dont les mécanismes d'altération à long terme sont bien cernés, avec une vitesse de corrosion estimée, en condition de stockage, comme étant extrêmement faible (de l'ordre de quelques **microns** en plusieurs siècles) ;

- une maîtrise de l'inventaire en plutonium. Tout le plutonium récupéré dans le traitement du combustible UOX usé est recyclé sous forme de combustible MOX ;

- la constitution d'une réserve de plutonium qui servira de ressource aux générations futures de réacteurs nucléaires. Le plutonium contenu dans les combustibles MOX usés est ainsi entreposé sous une forme concentrée et sûre, aisément mobilisable pour une utilisation ultérieure.

Cette stratégie de gestion des matières pourra se poursuivre au renouvellement du parc actuel, avec le déploiement de **réacteurs de 3^e génération** (EPR). De plus, elle ouvre la voie à des systèmes nucléaires pleinement durables, avec l'avènement de nouvelles technologies de réacteurs.

Les systèmes nucléaires futurs

Les options relatives au cycle du combustible constituent un point-clé pour répondre aux enjeux de préservation des ressources naturelles, de minimisation de l'impact environnemental ou de résistance aux risques de prolifération. Le recyclage des matières valorisables est difficilement contournable pour une utilisation pérenne de l'uranium et du plutonium, aujourd'hui entreposés dans les combustibles usés « de deuxième tour » (MOX usés, URE usés). Il permet ainsi de valoriser au mieux les matières fissiles (²³⁵U et ²³⁹Pu) et les matières fertiles (²³⁸U, avec notamment la valorisation des très importants stocks d'uranium appauvri).

(1) MOX (*Mixed OXides*) : mélanges d'oxydes d'uranium et de plutonium.

(2) PUREX (*Plutonium Uranium Refining by EXtraction*) : procédé **hydrométallurgique** de séparation de l'uranium et du plutonium contenus dans le combustible usé.



Pour y parvenir, il convient non seulement de disposer de procédés de recyclage performants, mais aussi de recycler les matières valorisables au sein de réacteurs aptes à en tirer le meilleur parti. À cet égard, les **réacteurs à eau légère (REL)** actuellement en fonctionnement dans le parc nucléaire mondial, même s'ils présentent des caractéristiques très intéressantes, ne paraissent pas pouvoir répondre à eux seuls à cet enjeu d'un développement durable à très long terme. Certaines caractéristiques de principe telles que l'évolution défavorable du vecteur isotopique⁽³⁾, au cours des recyclages successifs notamment, rendent difficile un recyclage récurrent efficace du plutonium et de l'uranium dans ces réacteurs. Tôt ou tard, l'introduction dans le parc de **réacteurs à neutrons rapides (RNR)**, dont les caractéristiques sont bien plus favorables sur ces points, sera nécessaire pour tirer tout leur potentiel des options de recyclage des matières (figure 2). Le recyclage des matières nucléaires dans des RNR apparaît donc comme la ligne de force pour les systèmes nucléaires du futur. C'est l'esprit du développement des systèmes de 4^e génération, dans lequel de nombreux États s'engagent aujourd'hui, notamment ceux qui affichent des perspectives de déploiement importantes comme la Chine et l'Inde, et auquel répond en France le projet de prototype ASTRID (voir ASTRID, *démonstrateur technologique du nucléaire de 4^e génération*, p. 26).



S. Le Couster/CEA

Préparation d'un essai en boîte à gants dans le cadre du procédé COEXTM à ATALANTE. De l'acide oxalique est ajouté à une solution purifiée d'uranium et de plutonium issue des cycles de coextraction. Il y a coprécipitation des deux **radionucléides**. On obtient un coprécipité d'oxalate mixte qui, après traitement thermique, conduit à un oxyde mixte d'uranium et de plutonium, lequel est recyclé au sein d'un nouveau combustible de type MOX.

Les RNR peuvent même permettre d'aller plus loin et de proposer des options de recyclage encore plus poussées. Leur capacité à mieux induire la **fission** des actinides mineurs (neptunium Np, américium Am et curium Cm) laisse envisager le recyclage de ces éléments, en complément de celui de l'uranium et du plutonium (figure 3).

Quel est l'enjeu d'une telle aptitude ? Il s'agit essentiellement de chercher à améliorer la gestion des déchets ultimes. Il serait possible de diminuer leur radiotoxicité à long terme en retirant les actinides mineurs, qui en sont les contributeurs principaux, et par ailleurs de réduire la chaleur résiduelle des déchets et d'accroître la compacité du stockage (et ainsi, à long terme, préserver la « ressource rare » que pourrait être un site de stockage).

La **loi du 28 juin 2006** appelle une évaluation des « perspectives industrielles (des) filières (de **transmutation**) », et le CEA a conduit, en partenariat avec **Areva** et **EDF**, des études pour délivrer une estimation aussi complète que possible des gains potentiels, des coûts et des détriments liés à la mise en œuvre de telles options.

Quelles orientations pour la recherche ?

Les performances des technologies déployées aujourd'hui sont remarquables, tant du point de vue de la qualité des produits générés que de celui des conditions dans lesquelles ils sont obtenus. La R&D dans ce domaine s'articule autour de quatre grands axes : adapter les technologies, les améliorer, les compléter et enfin, explorer de nouveaux concepts.

L'adaptation des technologies

Adapter les technologies à de possibles ou probables évolutions des combustibles, du contexte ou des stratégies de gestion constitue un premier enjeu. En particulier, le déploiement de RNR va évidemment de pair avec le recyclage systématique de leur combustible. Et, même si la forme oxyde persiste, ces combustibles présentent de nombreuses particularités par rapport aux combustibles des réacteurs à eau. Il a certes été montré par le passé que les procédés **hydrométallurgiques**, tels que ceux utilisés aujourd'hui, pouvaient

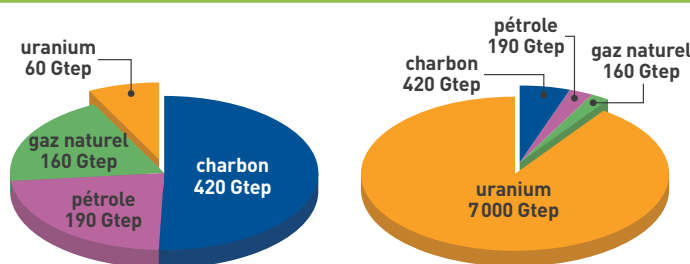


Figure 2. Parts relatives des ressources **fossiles** et de l'uranium, lorsque ce dernier est utilisé en REL (à gauche) et multirecyclé avec le plutonium en RNR (à droite). Les réserves mondiales prises en compte (ressources conventionnelles identifiées) sont de 189 Gt (189·10⁹ tonnes) pour le pétrole, 860 Gt (860·10⁹ tonnes) pour le charbon, 187 Tm³ (187·10¹² m³) pour le gaz naturel [BP Statistical Review of World Energy, juin 2011] et 4 Mt (4·10⁶ tonnes) pour l'uranium [Red Book, édition 2009 (RRA)].

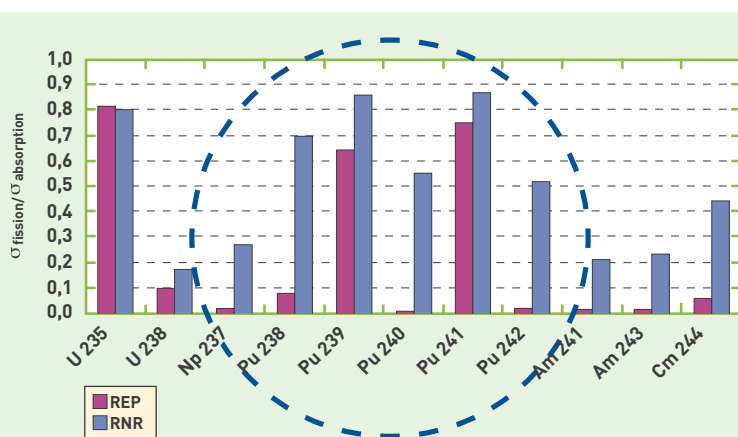


Figure 3. Rapport entre les sections efficaces de fission σ_{fission} (probabilité d'interaction d'un neutron avec un noyau, conduisant à sa fission) et les sections efficaces d'absorption neutronique $\sigma_{\text{absorption}}$ (probabilité d'absorption d'un neutron par un noyau, conduisant ensuite ou pas à sa fission) pour des isotopes d'uranium (U), de plutonium (Pu) et d'actinides mineurs (neptunium Np, américium Am et curium Cm) en REP et en RNR.

Robert N. Hill/Argonne National Laboratory, ACS meeting, 2007

(3) Le vecteur isotopique décrit, en pourcentage, les fractions respectives de chaque **isotope** d'un élément chimique.

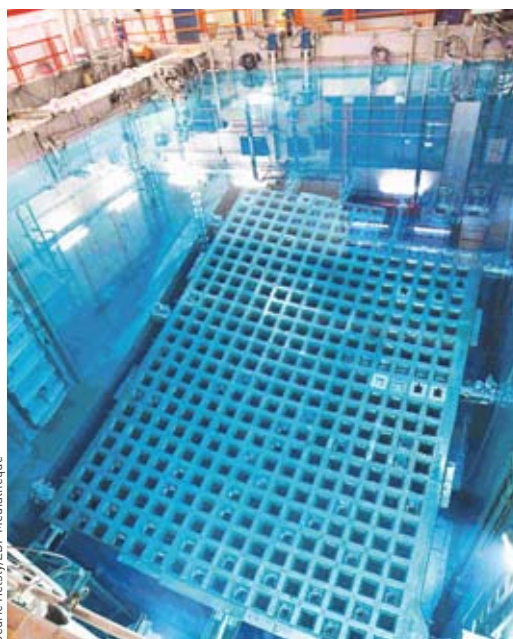
s'appliquer au traitement des combustibles de RNR –plus de 20 tonnes de combustible déchargées du réacteur **Phénix** ont été recyclées– cependant, dans la perspective d'un déploiement important, il convient d'optimiser leur mise en œuvre.

L'amélioration des technologies

Il ne s'agit pas tant de chercher à élever le niveau des performances actuelles des procédés de fabrication et de traitement –tout à fait suffisantes, voire même excellentes, et ne constituant donc pas un véritable enjeu de recherche– mais plutôt d'œuvrer à en diminuer encore le coût, les déchets ou les rejets associés, et à offrir les meilleures garanties de protection vis-à-vis des risques de prolifération. Ceci s'inscrit dans une démarche de progrès continus, qui a déjà donné de remarquables résultats. En témoignent la mise au point au CEA du procédé COEXTM(4) (en partenariat avec Areva) ou celle de la vitrification en creuset froid, qui constituent deux avancées majeures. La démarche peut et doit être poursuivie, car d'importantes marges de progrès subsistent, tant à l'amont qu'à l'aval du cycle : simplification des procédés, progression dans la sûreté des opérations, accroissement de la compacité des installations, réduction de la consommation de réactifs et des rejets dans l'environnement, déploiement d'outils de contrôle encore plus performants pour un pilotage plus fin des procédés.

Compléter les procédés existants

La recherche, dans le cadre de la **loi du 30 décembre 1991**, d'étapes complémentaires pour le recyclage des actinides mineurs, a été une voie particulièrement foisonnante au cours des quinze dernières années. De nouvelles architectures moléculaires, présentant une affinité sélective pour ces éléments, ont ainsi été, dans un très large cadre coopératif, synthétisées, expérimentées puis intégrées dans des étapes complémentaires au procédé PUREX. Les chercheurs du CEA



Piscine d'entreposage de combustible MOX dans la centrale nucléaire du Tricastin (Drôme). Les combustibles MOX usés sont entreposés sous eau en toute sûreté en vue d'un traitement différé. Le plutonium qu'ils contiennent, se trouvant sous une forme préconcentrée, servira de ressource aux réacteurs nucléaires du futur.

ont également démontré à l'échelle du laboratoire, sur des échantillons de combustibles usés et avec des technologies similaires à celles utilisables au niveau industriel, que ces nouveaux concepts étaient adaptés aux diverses voies envisageables pour le recyclage des actinides mineurs (figure 4). Ont ainsi été développés :

- les procédés DIAMEX et SANEX, pour la récupération de l'américium et du curium, en aval du procédé de traitement (expérimentés en 2005) ;
- le procédé GANEX (*Global ActiNides EXtraction*) qui, après séparation de l'uranium, permet une

(4) COEXTM (COEXtraction) : ce procédé, qui est une évolution de PUREX, permet l'extraction conjointe de l'uranium et du plutonium puis leur coprécipitation pour obtenir, par calcination, de l'oxyde mixte qui servira à fabriquer des combustibles de type MOX.

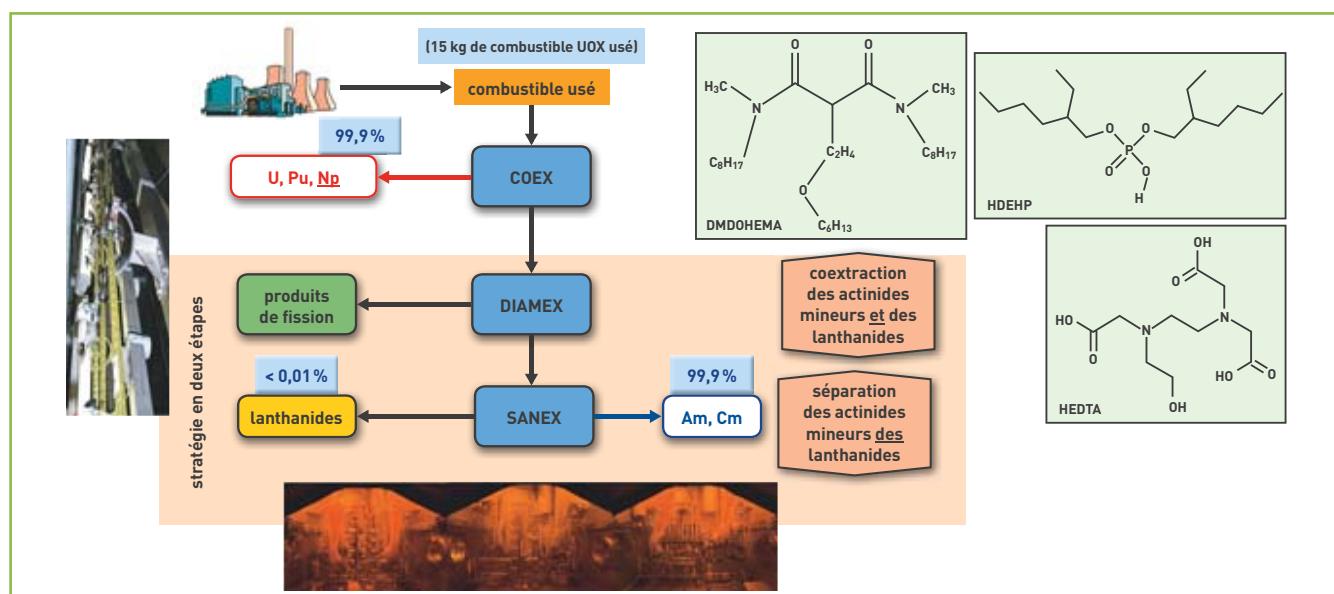


Figure 4.

Les essais de séparation des actinides mineurs menés dans l'installation ATALANTE (centre CEA de Marcoule). Une fois le plutonium retiré, les actinides mineurs constituent l'essentiel de la radioactivité résiduelle du combustible usé. La séparation des actinides mineurs, pour réduire en volume, et surtout en toxicité, les déchets ultimes est ainsi un axe important des travaux du CEA. Des procédés hydrométallurgiques, complémentaires de PUREX – et de COEXTM – ont été développés. Après extraction de plus de 99 % de l'uranium (U) et du plutonium (Pu) du combustible usé, le procédé DIAMEX permet de coextraire les actinides mineurs et les **lanthanides** à un taux de 99,9 %. Dans l'étape suivante, SANEX, 99,9 % de l'américium (Am) et du curium (Cm) sont séparés des lanthanides.



P. Dumas/CEA

Prototype évolutif de vitrification (PEV) équipé d'un four à creuset froid, installé au centre CEA de Marcoule. Dans cette technologie développée par le CEA, le verre est chauffé par induction directe. Le creuset, non chauffé, est refroidi par un dispositif de circulation d'eau. Une fine couche de verre figé se forme alors au contact du creuset froid, séparant ce dernier du verre fondu et évitant ainsi sa corrosion. Cette technologie ouvre des perspectives importantes en termes d'accroissement de capacité ou de conditionnement de déchets renfermant des éléments potentiellement agressifs.

extraction groupée de l'ensemble des transuraniens⁽⁵⁾, plutonium inclus (expérimenté en 2008) ;

- le procédé EXAm, pour la récupération du seul américium, le curium restant avec les produits de fission et n'étant pas recyclé (expérimenté en 2010). Les recherches se poursuivent pour mieux apprécier les conditions de mise en œuvre industrielle de ces concepts (synthèse à grande échelle des nouveaux

(5) Transuraniens : éléments chimiques radioactifs dont le numéro atomique (nombre de protons du noyau) est supérieur à celui de l'uranium, soit 92. Ils comprennent, notamment, les isotopes du neptunium, du plutonium, de l'américium et du curium.

extractants, résistance aux rayonnements, gestion des sous-produits, mise au point de dispositifs de pilotage...).

Explorer de nouveaux concepts

Le développement de nouveaux concepts, en rupture avec les technologies actuellement employées, constitue une voie de recherche activement explorée. Elle est aujourd'hui affichée aux États-Unis par les équipes du **DoE (US Department of Energy)**, lequel a lancé un vaste programme sans sélectionner à ce stade d'options particulières, avec l'horizon 2050 pour la mise en œuvre industrielle. De nombreux pays s'intéressent aux procédés de traitement pyrochimiques, qui consistent en une extraction des éléments à haute température dans un milieu de sels fondus. On leur prête en effet d'intéressantes potentialités de principe : compacité, aptitude à traiter des combustibles métalliques, réfractaires, peu refroidis... Toutefois ces procédés sont encore, pour l'essentiel, très éloignés de l'application industrielle, la question des déchets technologiques, liée à l'utilisation de hautes températures et de milieux particulièrement agressifs, restant une des interrogations les plus aiguës. Quoiqu'il en soit, l'expérience de décennies de R&D qui a été nécessaire pour amener le procédé PUREX au niveau actuel, à partir d'un concept très simple, à savoir l'extraction sélective à température ambiante, nous enseigne que le chemin est très long d'un concept de laboratoire à une technologie industrielle. Il n'en demeure pas moins qu'il importe de ne pas négliger l'émergence de ces nouveaux concepts. C'est d'ailleurs l'un des grands objectifs de l'**ICSM (Institut de chimie séparative de Marcoule)**, dans le Gard, où **CNRS**, université et CEA œuvrent ensemble dans ce qui doit constituer un « laboratoire de nouvelles idées » pour les procédés de cycle du futur.

Un futur inscrit dans la durabilité

Les technologies aujourd'hui employées pour le cycle du combustible donnent au parc nucléaire français une assise et une cohérence remarquables. Elles préparent en outre la possibilité de déployer à l'avenir des options encore plus abouties, pour l'avènement de systèmes pleinement durables sur le très long terme. La préparation de ces prochaines étapes est un enjeu majeur, et il paraît primordial, forts des progrès accomplis jusqu'ici, de maintenir un effort de recherche élevé dans le domaine. Deux points semblent mériter une attention particulière : le besoin de développer des technologies flexibles, pouvant être mises en œuvre dans un parc en évolution, et l'importance des infrastructures de recherche. L'installation ATALANTE (CEA, Marcoule) permet de mener des recherches sur plusieurs domaines du cycle des matières et à diverses échelles, des aspects fondamentaux jusqu'aux expériences démonstratives, sur plusieurs kilogrammes de matières (figure 5). La pertinence de sa conception en a fait, depuis quelques années, un outil et un atout essentiels aux mains des équipes du CEA. Car, dans ce domaine également, l'anticipation est un enjeu capital.

> Bernard Boullis

Direction de l'innovation
et du soutien nucléaire (DISN)
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay

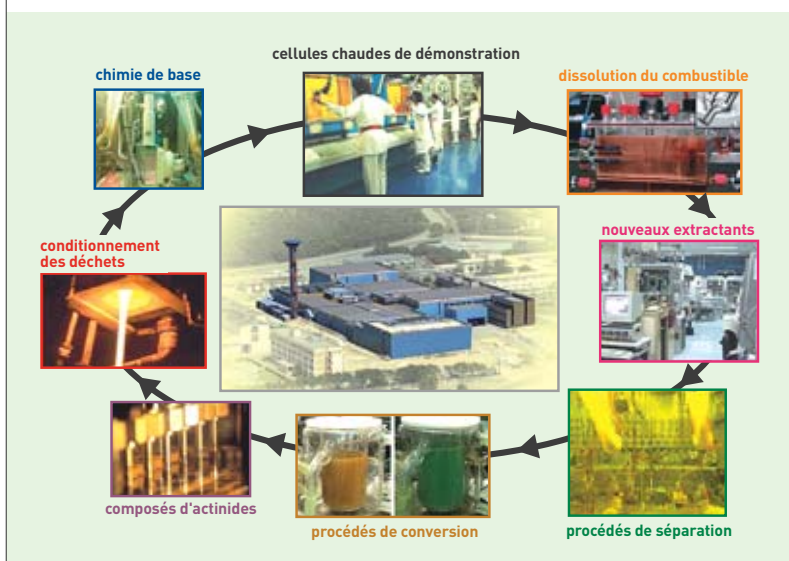


Figure 5. L'installation de recherche ATALANTE. Située au centre CEA de Marcoule, l'installation ATALANTE est le principal outil de recherche du CEA dans le domaine de l'aval du cycle du combustible nucléaire. Plusieurs programmes de R&D y sont menés depuis 1992, notamment dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. Constituée d'un ensemble de laboratoires, équipés de boîtes à gants, et de chaînes de cellules blindées, elle est construite de façon modulaire avec des servitudes communes, afin de pouvoir reconfigurer un local particulier pour les besoins des programmes de recherche.

Assainissement et démantèlement des installations nucléaires

Le cycle de vie du nucléaire est étroitement lié à celui de ses installations. En tant qu'exploitant nucléaire, le CEA est responsable de l'assainissement et du démantèlement de ses installations arrivées en fin de vie, ainsi que de la gestion des déchets qui en sont issus. Ces opérations doivent être pilotées dans le respect des règles de sûreté et de minimisation de l'impact sur l'environnement, dans une optique de développement durable, et dans une logique de maîtrise des coûts et de tenue des délais.

Pour le CEA, conduire la recherche dans le domaine du nucléaire implique obligatoirement un parc d'installations en évolution et qui s'adapte sans cesse aux enjeux de la recherche. En effet, des besoins nouveaux apparaissent, les procédés développés sont plus performants et les exigences en matière de sûreté se renforcent. Il est donc nécessaire de mener à bien des programmes de construction et de rénovation d'installations et d'assurer en parallèle des programmes d'assainissement et de démantèlement des installations en fin de vie.

Les opérations de démantèlement

À l'issue de leur période de fonctionnement, les installations nucléaires font l'objet d'opérations qui permettent leur arrêt définitif, puis leur démantèlement et leur assainissement final avant leur déclassement. Le démantèlement comprend notamment des opérations de démontage d'équipements, d'assainissement des locaux et de destruction de structures de génie civil. Ces opérations sont génératrices de déchets, **radioactifs** ou non, qu'il convient de traiter et de conditionner en vue de leur évacuation.

Le terme général de démantèlement couvre l'ensemble des activités techniques ou administratives permettant d'atteindre un état final prédéfini de l'installation, afin d'obtenir son déclassement réglementaire et sa suppression administrative de la liste des installations nucléaires de base.

La stratégie du CEA est conforme aux recommandations des autorités de sûreté nucléaire, l'**ASN** pour le domaine des applications civiles du nucléaire et l'**ASND** pour les applications de défense. Elle consiste à procéder au démantèlement des installations nucléaires au plus tôt après leur mise à l'arrêt définitif, de façon à réduire les risques radiologiques dans les meilleurs délais et à bénéficier des compétences des salariés encore présents.

La Direction de l'énergie nucléaire (DEN) a la responsabilité de mener à bien l'ensemble de ces opérations sur les sites de Cadarache, Marcoule, Grenoble, Saclay et Fontenay-aux-Roses. La complexité et la durée de ces opérations dépendent de l'historique des installations et, *in fine*, de leur devenir envisagé dans leur site d'accueil.

Il n'existe pas d'obstacle technologique rédhibitoire au démantèlement des installations nucléaires. Ces opérations sont réalisables dans de bonnes conditions de sûreté et de radioprotection, grâce à l'emploi de moyens télé-opérés et à distance quand l'environnement radiologique le nécessite.

La loi relative à la Transparence et à la Sécurité en matière Nucléaire du 13 juin 2006 (loi TSN) et ses



décrets d'application font références dans le sens d'un meilleur suivi du contrôle et de l'encadrement des opérations de démantèlement, de la gestion des déchets et du transport de substances radioactives. Chaque exploitant nucléaire établit un plan de démantèlement pour chacune de ses nouvelles installations, dès leur création, et pour celles déjà existantes au plus tard trois ans avant la mise à l'arrêt définitif. Ce plan précise les modalités d'exécution des opérations de démantèlement. L'exploitant y justifie l'état final dans lequel il prévoit de maintenir l'installation (bâtiment conservé, modalités de surveillance de l'environnement en cas de radioactivité résiduelle, etc.). Dès la conception d'une installation, le processus de démantèlement est ainsi pris en compte. Par exemple, les scientifiques qui conçoivent l'installation **ITER** à proximité du site de Cadarache se penchent dès à présent sur son démantèlement, envisagé à l'horizon 2050, et sur la meilleure façon de le concevoir, tout en limitant les charges de démantèlement.

Un pilotage opérationnel

À partir des années cinquante, des opérations de démantèlement d'installations nucléaires ont été engagées en France, essentiellement par le CEA, avec notamment la première usine de **plutonium** de Fontenay-aux-Roses et deux petits réacteurs de recherche, César et Peggy, à Cadarache. Depuis une quinzaine d'années, les activités de démantèlement ont pris de plus en plus d'ampleur car de nombreuses installations nucléaires ont été construites entre les

Le dôme 2 du réacteur Siloé, situé sur le centre CEA de Grenoble, après les opérations d'assainissement et de démantèlement. Des contrôles radiologiques sont effectués sur la totalité du sol et sur des milliers de points des murs et du plafond, définis de façon aléatoire et identifiés par des marques bleues.



CLEFS CEA - N°61 - PRINTEMPS 2013



Les étapes du démantèlement du réacteur Mélusine du centre CEA de Grenoble. 1988 : le hall du réacteur en activité ; 1994 : opérations de démontage des expériences et des protocoles associés ; 2003 : piscine du réacteur en fin d'assainissement après vidange ; mi-2005 : contrôles finaux de la piscine après écroûtage du béton ; 2008 : hall du réacteur après retrait du bloc piscine et des structures internes (état physique de l'INB au moment de son déclassement fin 2011).

en ce sens qu'il traite de l'ensemble des installations nucléaires d'un site du CEA jusqu'à l'étape de déclassement, dans un calendrier relativement court. Projet emblématique, il fait l'objet d'un suivi au plus haut niveau du CEA, afin que le retour d'expérience profite aux différents centres du CEA, mais également aux autres secteurs d'activités nucléaires en France.

Passage est arrivé à son terme et l'heure des bilans est venue. En matière de sécurité, préoccupation première du CEA, on doit se féliciter du faible nombre et du peu de gravité des accidents de personnes, du fait de la maîtrise des opérations menées et grâce au travail d'anticipation et d'analyse des scénarios envisagés. En termes d'impact environnemental, les analyses de l'air, de l'eau et les mesures effectuées sur la faune et la flore des alentours du site montrent des niveaux de rejet radioactif extrêmement faibles, bien en dessous des limites autorisées.

Le démantèlement aura généré de l'ordre de 25 000 m³ de déchets radioactifs, dont environ 22 000 m³ de déchets de très faible **activité** (TFA), 3 000 m³ de déchets de faible et moyenne activité (FA-MA), qui ont rejoint les centres de stockage existants exploités par l'**Andra** (**Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs**), et 20 m³ de déchets de haute activité (HA). Ces derniers sont actuellement entreposés dans des installations dédiées de Saclay et de Cadarache, en attente d'un stockage en couche géologique profonde.

La communication et l'information des acteurs et des médias régionaux sont aussi des éléments du succès du projet.

Sur le plan humain, la majorité des 150 salariés du CEA qui travaillaient en 2001 sur ces installations a progressivement pu prendre part aux nouvelles activités du site de Grenoble, avec une reconversion thématique à la clé. D'autres, forts de leur expérience, rejoignent ou vont rejoindre Marcoule, Cadarache ou encore Fontenay-aux-Roses. Dès l'origine du projet Passage, le CEA a engagé des actions destinées à maîtriser les compétences nécessaires à la réalisation du projet et à préparer la reconversion des salariés. Le retour d'expérience dans ce domaine est très positif.

Enfin, le budget du projet Passage, d'un montant de 267 millions d'euros, est resté maîtrisé. Les dépenses se sont étalées dans le temps comme indiqué en figure 2.

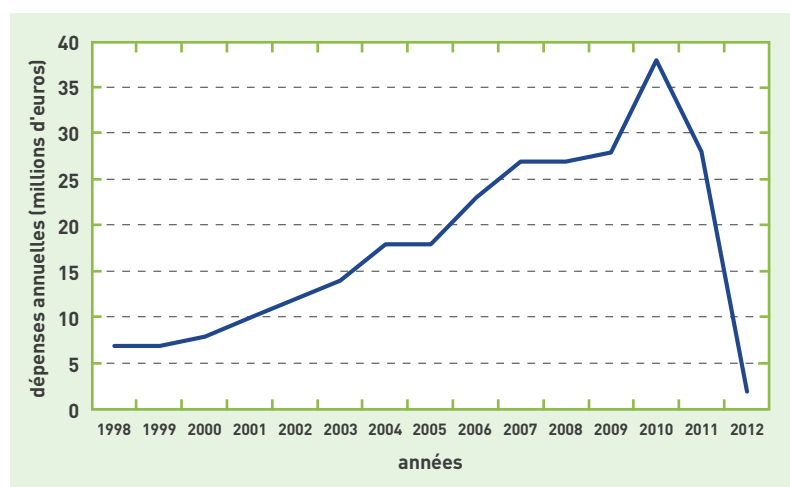


Figure 2. Évolution des dépenses sur la durée du projet Passage. Elles sont restées dans les limites du budget prévu (267 millions d'euros en base courante bloquée).

Le centre CEA de Grenoble est aujourd'hui essentiellement tourné vers la recherche technologique (micro- et nanotechnologies, nouvelles technologies de l'énergie et biotechnologies). Il mène également des travaux de recherche fondamentale dans le domaine des sciences du vivant et en physique de la matière.

En permettant au centre de Grenoble de se concentrer sur ces activités stratégiques, le projet Passage démontre avec force que la réversibilité des installations nucléaires est une réalité.

> **Didier Dall'ava¹, Frédéric Tournebize², Bernard Comte³ et Didier Lelievre⁴**

¹Direction de l'assainissement et du démantèlement nucléaire (DADN)
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay

²Département des projets d'assainissement-démantèlement
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Grenoble

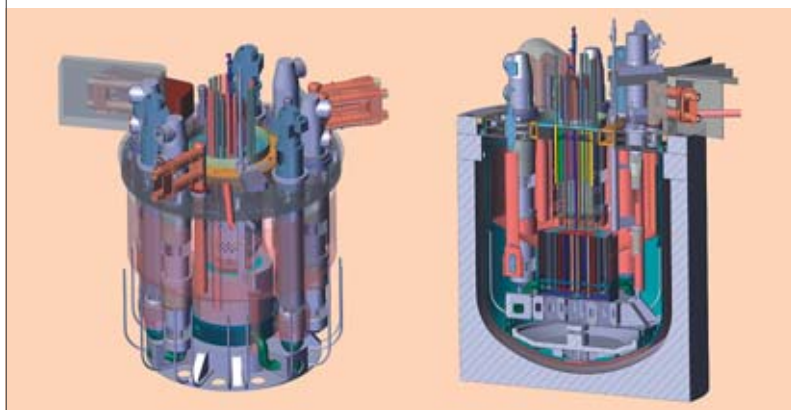
³Institut Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble

⁴Direction de la qualité et de l'environnement (DQE)
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay



ASTRID, démonstrateur technologique du nucléaire de 4^e génération

Aptitude à un développement énergétique durable, compétitivité économique, sûreté et fiabilité renforcées, résistance à la prolifération. Tels sont les grands objectifs auxquels devront satisfaire les réacteurs nucléaires de 4^e génération. Très impliqué dans cette démarche de conception des systèmes nucléaires du futur, le CEA s'attache notamment au développement d'un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium de 4^e génération, le prototype ASTRID. **ASTRID intégrera un ensemble de technologies innovantes qui seront autant de progrès décisifs par rapport à ses prédécesseurs. Elles en feront un véritable démonstrateur de l'opérabilité industrielle des réacteurs de 4^e génération.**



Le réacteur ASTRID vu en entier et en coupe (circuit primaire). Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium, d'une puissance électrogène de 600 MWe, ASTRID est un démonstrateur technologique conçu pour démontrer l'opérabilité des choix innovants permettant à la filière des réacteurs à neutrons rapides de remplir les critères de la 4^e génération.

Alors que la 3^e génération de réacteurs nucléaires est en cours d'industrialisation, avec notamment la construction de plusieurs EPR, en Europe et en Chine, la 4^e génération se prépare dans le cadre d'une association intergouvernementale lancée en 2000, le **Forum international Génération IV** (GIF, pour *Generation IV International Forum*).

Dans une optique de développement durable de l'énergie nucléaire et face aux risques de changements climatiques et d'épuisement des ressources fossiles et en uranium, le GIF a fixé plusieurs objectifs aux systèmes nucléaires du futur. Ils devront pouvoir recycler le **plutonium** sans limitation du nombre de **recyclages** (multirecyclage), exploiter le mieux possible la ressource en uranium et, si cette option est retenue, être capables de réaliser la **transmutation** de certains **actinides mineurs**. Ceci implique la conception de réacteurs fonctionnant en **spectre de neutrons rapides**, couplés à un **cycle fermé du combustible**. Les réacteurs de 4^e génération seront aussi tenus de présenter un niveau de sûreté au moins équivalent à celui des réacteurs de 3^e génération et d'intégrer le retour d'expérience des évaluations de sûreté menées sur les centrales françaises, suite à l'accident de Fukushima (Japon). Enfin, ils devront atteindre une compétitivité économique satisfaisante compte tenu du service rendu et offrir des garanties de résistance face aux risques de **prolifération nucléaire**.

Dans ce cadre, le GIF a sélectionné six concepts de réacteurs : quatre mettent en œuvre des neutrons rapides et deux des **neutrons thermiques**⁽¹⁾. Un plan de R&D a été défini afin d'apporter les innovations nécessaires à leur déploiement.

La maturité technologique des systèmes retenus par le GIF est très variable. Le CEA se concentre principalement sur deux filières : les **réacteurs à neutrons rapides** (RNR) refroidis au **sodium** (RNR-Na) et, dans une moindre mesure, les RNR refroidis au gaz (RNR-G), surtout en ce qui concerne l'innovation sur les matériaux.

Les atouts des réacteurs à neutrons rapides

La filière des RNR présente des avantages extrêmement importants en matière d'énergie durable. En premier lieu, elle autorise une excellente utilisation de la ressource en uranium et a la capacité de multirecycler le plutonium. En effet, alors que les réacteurs actuellement exploités sur le parc nucléaire français et les futurs EPR n'emploient qu'environ 1 % de l'**uranium naturel**, les RNR peuvent consommer plus de 80 % de la ressource. Avec le stock d'uranium appauvri disponible à ce jour sur le territoire français, il serait ainsi théoriquement possible d'alimenter un parc de RNR pendant plusieurs milliers d'années. Les RNR sont également une source d'énergie intensive, dont le fonctionnement n'émet aucun gaz à effet de serre. Enfin, ils sont aptes à brûler les actinides mineurs en produisant de l'électricité, d'où une forte réduction de la quantité et de la durée de vie des **déchets radioactifs ultimes**.

Le choix du sodium comme fluide **caloporteur** pour refroidir le cœur du réacteur est lié à une analyse multicritère. Outre le fait qu'il ne ralentit pas les neutrons – une condition essentielle – le sodium

(1) Neutrons rapides : SFR (Sodium-cooled Fast Reactor, RNR-Na en français) ; GFR (Gas-cooled Fast Reactor, RNR-G en français) ; MSR (Molten Salt Reactor, RSF en français) ; LFR (Lead-cooled Fast Reactor, RNR-Pb en français). Neutrons thermiques : SCWR (Super Critical Water-cooled Reactor, RESC en français) ; VHTR (Very High Temperature Reactor, RIHT en français).

À ce sujet, voir *Clefs CEA* N° 55, Été 2007, p. 6-7.

liquide est doté de bonnes propriétés thermiques (**conductivité**, évacuation de la chaleur) et de **viscosité**, montre une faible **activation** sous les neutrons, est compatible avec les aciers... Ses principaux inconvénients résident en son opacité et en sa forte réactivité chimique avec l'eau et l'air.

Les RNR-Na (figure 1) ont fait l'objet de nombreux projets dans le monde. Ils ont permis d'accumuler plus de 400 années-réacteur d'exploitation.

Renforcer la sûreté des RNR-Na

Depuis plusieurs années, le CEA, en partenariat avec EDF et Areva, s'attache à renforcer les lignes de défense et la robustesse de la démonstration de sûreté afin de hisser la technologie des RNR-Na au niveau requis pour des réacteurs de 4^e génération. L'effort porte notamment sur la conception du cœur, les moyens d'évacuation de la **puissance résiduelle** et la résolution du problème lié à la réactivité du sodium avec l'eau.

Le CEA et ses deux partenaires travaillent ainsi à l'élaboration d'un cœur à faible vidange (CFV) qui, contrairement à ceux conçus précédemment, a la particularité de présenter un **coefficient de vidange** du sodium très faible, voire négatif⁽²⁾. En contrôlant la **réactivité** du réacteur, ce cœur constitue un progrès décisif en termes de sûreté.

En matière d'évacuation de la puissance résiduelle, il faut rappeler l'importance de l'**inertie thermique** et de la marge par rapport à l'ébullition du caloporteur : plus celles-ci sont élevées, plus le réacteur sera résistant à l'augmentation de température en cas de perte des sources d'évacuation de la puissance résiduelle. Or, un RNR-Na intégré possède une inertie thermique multipliée par la marge à l'ébullition presque 20 fois supérieure à cette même grandeur sur un **réacteur à eau sous pression (REP)** de conception standard. En complément, les RNR-Na comportent une combinaison de systèmes, **passifs** et **actifs**, redondants et diversifiés, permettant l'évacuation de la puissance résiduelle dès la chute des barres de contrôle, et ce même en cas de perte totale des alimentations électriques et de la source froide en eau. En effet, certains de ces circuits fonctionnent par circulation naturelle passive (thermosiphon) et utilisent l'atmosphère comme source froide (figure 2). Leur efficacité a été vérifiée à plusieurs reprises lors de tests sur les réacteurs **Phénix** et **Superphénix**.

Enfin, en ce qui concerne la réaction sodium-eau, l'objectif est de réaliser des réacteurs qui, soit éliminent totalement la possibilité d'une telle réaction par l'emploi d'un fluide alternatif (de l'azote à la place de l'eau par exemple), soit garantissent l'absence de conséquences sur la sûreté au cas où une telle réaction aurait lieu malgré les lignes de défense mises en place (concept de générateurs de vapeur modulaires).

ASTRID, un RNR-Na de 4^e génération

Sur la base de l'expertise acquise sur les RNR-Na qui ont fonctionné dans le passé (notamment Phénix) ou qui fonctionnent actuellement (BN-600 en Russie), le CEA s'intéresse à un ensemble d'options technologiques nouvelles pour développer un réacteur de 4^e génération, ASTRID (*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*) : prototype d'intégration technologique permettant la démonstration de sûreté et de fonctionnement à l'échelle industrielle de

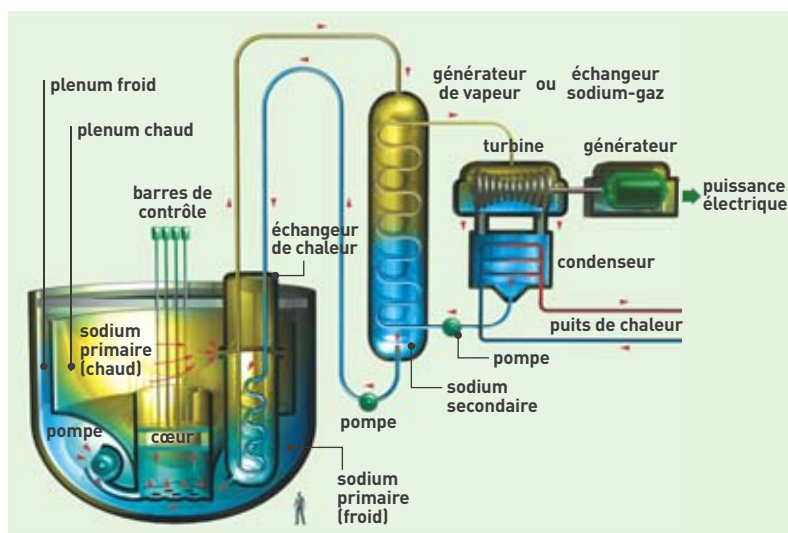


Figure 1. Principe de fonctionnement d'un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na) de type intégré. Par rapport à un réacteur à eau sous pression (REP) de conception standard, plusieurs points sont à retenir : le circuit primaire du réacteur est intégré dans la cuve principale, laquelle contient non seulement le cœur, mais aussi les échangeurs intermédiaires et les pompes primaires ; il existe un circuit intermédiaire en sodium qui sert de barrière entre le sodium primaire et le circuit de conversion d'énergie ; le circuit primaire n'est pas pressurisé et possède une grande inertie thermique ; enfin, l'architecture générale du réacteur offre une excellente radioprotection des travailleurs.

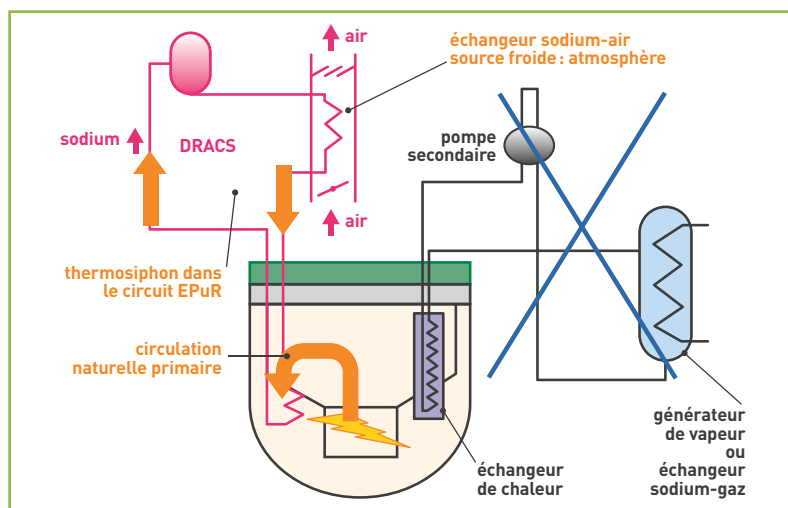


Figure 2. Évacuation autonome de la puissance résiduelle (EPuR) d'un RNR-Na. En cas de perte de l'évacuation normale de la puissance résiduelle (perte des pompes primaires et du circuit secondaire, chute des barres de contrôle), un RNR-Na présente, outre une grande inertie thermique, une combinaison de systèmes rendant possible l'évacuation autonome de la puissance résiduelle. Pendant les premières dizaines de secondes, l'inertie des pompes primaires permet de refroidir la puissance résiduelle des assemblages, très élevée juste après la chute des barres. Après l'arrêt des pompes primaires, la circulation naturelle du circuit primaire s'installe. Elle est renforcée par un circuit d'EPuR de type DRACS (*Direct Reactor Auxiliary Cooling System*), qui fonctionne par circulation naturelle passive (thermosiphon) avec l'air comme source froide.

réacteurs rapides refroidis au sodium de 4^e génération. ASTRID répondra à des garanties de sûreté et de sécurité au moins équivalentes à celles de la 3^e génération de réacteurs, prenant en compte le retour d'expérience de l'accident de Fukushima dès la conception, et démontrera des progrès significatifs en matière d'exploitation industrielle. ASTRID sera également doté de capacités de transmutation de déchets radioactifs afin de poursuivre les expérimentations sur ce sujet à une échelle significative.

(2) Un coefficient de vidange positif signifie que la réactivité du réacteur augmente en cas de disparition du sodium, par ébullition, par exemple.

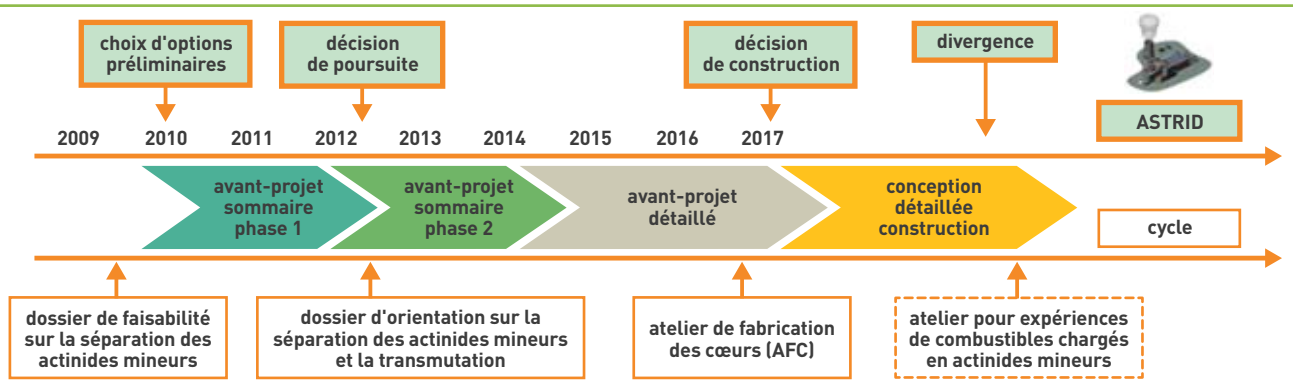


Figure 3. Le calendrier d'ASTRID. Le programme ASTRID est constitué de la réalisation du réacteur proprement dit, de la construction de boucles de validation technologique en sodium et de la validation sur celles-ci de composants à l'échelle 1. Il comprend également l'élaboration d'un atelier de fabrication du combustible des cœurs (AFC). Le début de la phase de conception détaillée et de construction est prévu en 2018 pour une mise en service à l'horizon 2023.

Pour répondre aux objectifs de la 4^e génération, ASTRID présentera des innovations décisives par rapport aux précédents RNR-Na :

- un cœur amélioré à coefficient de vidange très faible, voire négatif. Ce cœur, qui confère au réacteur un comportement naturel favorable en cas de perte de refroidissement, constitue une avancée essentielle dans le domaine de la sûreté ;
- l'installation possible de dispositifs complémentaires de sûreté dans le cœur. Sont explorés par exemple des dispositifs d'insertion passive d'anti-réactivité (brevet SEPIA), qui permettent l'atteinte d'un état sûr du réacteur lors d'une perte de refroidissement sans chute des barres de contrôle, ou bien des systèmes de plaquettes renforcées pour écarter le risque de compaction du cœur ;
- l'augmentation des performances de l'instrumentation du cœur : thermocouples pour suivre la température des **assemblages**, chambres à **fission** pour la détection des neutrons et des **produits de fission**, technologies par ultrasons pour les mesures de déplacement, détection acoustique de l'ébullition, mesures de débit... ;
- un système de conversion d'énergie à générateurs de vapeur modulaires, pour limiter les effets d'une éventuelle réaction sodium-eau, ou à échangeurs sodium-azote, pour supprimer totalement la présence d'eau à proximité du sodium ;
- une grande inertie thermique, une **convection** naturelle et l'élimination pratique de la perte totale et prolongée des moyens d'évacuation de la puissance résiduelle ;
- l'élimination des grands feux de sodium par case-matage et/ou inertage de locaux ;
- la prise en compte des agressions externes (séisme, inondation, chute d'avion...) dès la conception, avec suffisamment de marges pour garantir l'absence d'**effet falaise**, garantissant la faculté du réacteur à revenir à un état sûr ;
- une réflexion d'ensemble de l'architecture du réacteur garantissant une résistance accrue aux risques de prolifération.

ASTRID intégrera également des dispositions permettant de réduire la durée des arrêts pour le rechargement du combustible et d'augmenter le **taux de combustion** et la durée de **cycle**. L'inspection en service, intervention et réparation est aussi prise en considération dès le début : simplification de l'architecture du circuit primaire, objectif d'inspection de toutes les structures dont la défaillance serait préjudiciable pour la sûreté (accessibilité

des structures, inspection par l'extérieur, robots porteurs), composants démontables pour réparation ou remplacement.

D'une puissance de 600 MWe, ASTRID sera conçu pour une durée de vie de soixante ans, équivalente à celle de l'EPR.

Un projet ambitieux

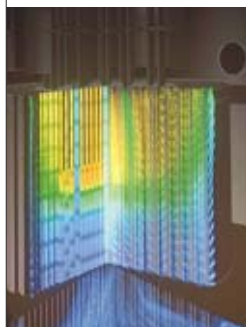
Le prototype ASTRID devrait être opérationnel à l'horizon 2023. La première échéance du programme, fixée par la **loi du 28 juin 2006**, a été atteinte fin 2012, après la première phase d'un Avant-projet sommaire (APS) engagé par le CEA sur 2010-2012. À partir du retour d'expérience des réacteurs précédents et d'un programme de R&D conséquent, ces premières études ont permis de définir les options techniques innovantes et les orientations de sûreté. La deuxième phase de l'APS se déroulera de 2013 à 2014. L'avant-projet détaillé est quant à lui prévu de 2015 à 2017, pour une entrée dans la phase d'études d'exécution et de construction proprement dites à la fin de cette période (figure 3). À chaque étape-clé, une revue des options retenues est effectuée de façon à garantir le respect des critères de la 4^e génération.

Les études de conception d'ASTRID, phase d'avant-projet détaillé incluse, sont financées par le **Programme d'investissements d'avenir (PIA)**, action « Nucléaire de demain ». Le PIA couvre également les études pour la construction d'un atelier de fabrication des cœurs d'ASTRID ainsi que la rénovation ou la réalisation d'installations technologiques de qualification de composants à l'échelle 1. Au total, jusqu'à fin 2017, 650 millions d'euros sont attribués au titre du PIA pour le programme ASTRID.

Pour la mise en œuvre du projet, le CEA s'est entouré d'industriels qui participent aux études au travers d'accords de collaboration prévoyant une contribution sur fonds propres des partenaires. En comptant les partenariats actuels, plus de 500 personnes travaillent sur le projet ASTRID, R&D et études de conception, et d'autres collaborations sont en cours de discussion. Élément-clé permettant de démontrer la faisabilité industrielle d'un réacteur de 4^e génération, ASTRID est un projet ambitieux qui prépare le déploiement d'une filière de réacteurs à neutrons rapides à l'horizon 2040.

➤ **François Gauché**

Direction de l'innovation
et du soutien nucléaire (DISN)
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay



Cœur à faible vidange (CFV) du réacteur ASTRID visualisé sur le mur d'images de la Direction de l'énergie nucléaire. De conception innovante, ce cœur est beaucoup plus robuste lors des accidents de perte globale de refroidissement du cœur.

P. Stropia/CEA

La fusion, une source d'énergie pour l'avenir

Même si elle ne peut apporter une contribution immédiate à l'équation du mix énergétique, la fusion nucléaire par confinement magnétique est plus que jamais une voie à explorer pour les futurs réacteurs électrogènes de grande envergure. **Les confirmations expérimentales et l'amélioration constante des simulations ont permis d'enclencher avec confiance la construction du tokamak ITER, actuellement en cours à Cadarache.** Les résultats d'ITER et le programme scientifique et technique qui l'accompagne ouvriront, à l'horizon de la seconde moitié de ce siècle, la voie vers le réacteur de démonstration. Le CEA y contribue activement.

La recherche en **fusion** nucléaire par confinement magnétique est une recherche à dimension sociétale qui vise un but unique : développer, dans les conditions de sécurité souhaitées, une source d'énergie basée sur le principe de la fusion de deux noyaux légers. De manière schématisée, on peut parler de la domestication de l'énergie produite dans les étoiles, en particulier dans notre Soleil.

Les atouts de la fusion

Disposer d'une source d'énergie préservant les avantages de l'énergie nucléaire en matière de concentration de puissance électrique, tout en résolvant la problématique de la gestion du **combustible nucléaire** (production et **stockage** de **radionucléides** à **période** longue), telles étaient les motivations initiales des années cinquante et soixante. Sur Terre, la réaction la plus accessible pour aller vers ce type d'application consiste à faire fusionner un noyau de **deutérium** avec un noyau de **tritium**. Cette réaction, qui se déroule dans un **plasma** confiné par un champ magnétique, donne naissance à un noyau d'hélium stable et à un neutron. Les déchets potentiels du processus sont donc uniquement liés à l'**activation** de la structure du réacteur. La fusion présente en outre un avantage majeur en matière de non-**prolifération** et constitue un atout en termes de disponibilité des matières premières. En effet, le deutérium se trouve en quantité quasi inépuisable dans les océans. Quant au tritium, **isotope radioactif** de l'hydrogène non disponible à l'état naturel, il est créé dans le réacteur, *via* l'interaction entre les neutrons engendrés par les réactions de fusion et le lithium placé dans les couvertures de l'enceinte de confinement (figure). Or, le lithium est très abondant sur Terre. Il faut enfin souligner les atouts de l'énergie de fusion en matière de non-production de gaz à effet de serre (GES). Ces atouts, mis en exergue plus tardivement, sont équivalents à ceux de l'énergie nucléaire de **fission**. Ils allient une émission nulle de gaz carbonique (CO_2) en fonctionnement aux taux ponctuels usuels de formation de ces GES dans les phases de construction ou de démantèlement d'une installation industrielle majeure.

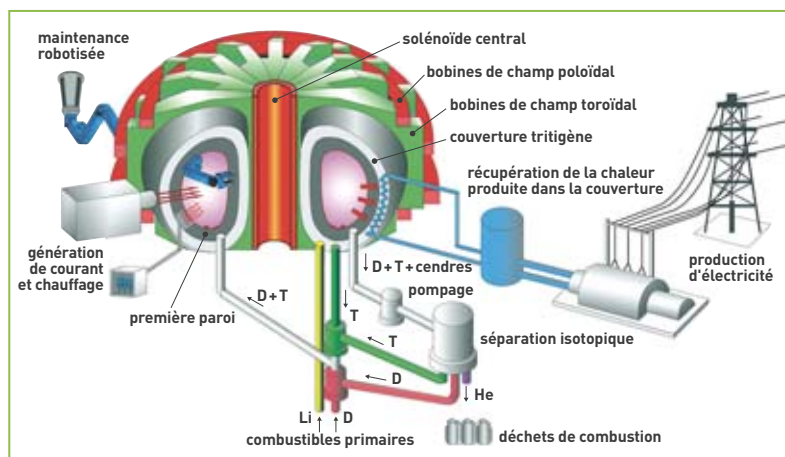
La longue histoire de la fusion

Pour relever le défi de la fusion, il a fallu en premier lieu établir si elle était réalisable sur Terre, dans des conditions à taille humaine. La bonne nouvelle, le résultat



P. Stroppa/CEA

La chambre à vide du tokamak Tore Supra. Installé au centre CEA de Cadarache, Tore Supra a été mis en service en 1988. Principalement dédié à l'étude de la physique et des technologies permettant de réaliser des plasmas performants de longue durée, il est le seul tokamak européen à combiner composants supraconducteurs et composants face au plasma activement refroidis. Il a permis d'obtenir des avancées scientifiques et technologiques majeures pour ITER.



CEA

Figure.

Principe de fonctionnement d'un réacteur de fusion nucléaire par confinement magnétique. Le combustible primaire, un mélange de deutérium (D) et de lithium (Li), à partir duquel sera généré du tritium (T), est injecté dans la chambre à vide du réacteur. Il est ensuite chauffé, par des systèmes de chauffage additionnel, à une température d'au moins 150 millions de degrés Celsius afin d'atteindre le point d'ignition du plasma. Une partie de l'énergie des noyaux d'hélium (He) issus de la fusion entre le deutérium et le tritium suffit ensuite à maintenir cette température, l'apport d'énergie externe servant alors au contrôle de la réaction. L'énergie de fusion est transférée dans la couverture qui tapisse la surface interne de la chambre à vide (composants face au plasma) par les neutrons créés lors de la réaction de fusion, ainsi que par la conduction et le rayonnement de l'énergie du plasma lui-même, puis récupérée pour la production d'électricité. Le plasma est confiné, maintenu à distance des parois et stabilisé par de puissants aimants supraconducteurs (bobines de champ poloidal et bobines de champ toroidal). Le tritium, brûlé au fur et à mesure des réactions de fusion, est remplacé par du tritium formé lors de l'interaction des neutrons avec le lithium des couvertures tritigènes.



tangible et remarquable apporté par la Communauté scientifique à la fin du XX^e siècle, a été de montrer que cela était possible. En clair, le dimensionnement de physique a permis de conclure qu'un réacteur de fusion est envisageable dans des installations comparables en taille à celles actuellement connues pour la production massive d'électricité. Il conduit à des unités générant une puissance électrique de l'ordre d'un à quelques **GW**. Cette étape déterminante a été franchie à la fin des années quatre-vingt-dix, avec notamment une démonstration expérimentale sur le **tokamak** européen JET (*Joint European Torus*). Saluée universellement, elle a clôturé la première phase, longue mais décisive, de l'histoire de la fusion nucléaire contrôlée, la phase des pionniers. Cette dernière comprend typiquement deux époques.

Trouver une solution pour confiner un plasma

La première époque couvre deux décennies, de la déclassification des recherches en 1958 à la décision de construction du JET en 1980. Elle a vu l'exploration, de par le monde, de très nombreuses voies visant à développer une configuration magnétique, c'est-à-dire une boîte immatérielle capable de confiner un plasma extrêmement chaud qu'aucun mur matériel ne peut contenir. Dans une ambiance hautement compétitive, la configuration tokamak, proposée par les chercheurs russes en 1968 et non détrônée depuis, est arrivée largement en tête. Si d'autres configurations ont été purement et simplement écartées, certaines voies alternatives (**stellarator**, **confinement inertielle**) ont été conservées et sont encore d'actualité.

L'ère des tokamaks

Cette époque, qui couvre les deux décennies suivantes, a été marquée par l'exploitation des grands tokamaks, dont le plus grand à ce jour reste le JET. Elle a été consacrée à définir les performances de la configuration tokamak, c'est-à-dire à établir les lois permettant d'extrapoler les résultats acquis à la conception d'un réacteur. Il s'est agi de combiner

des informations expérimentales (construction de prototypes, mesure des paramètres d'études, analyses et interprétations), des informations théoriques (sélection des processus physiques qui régissent le phénomène, simulations, confrontations aux résultats de l'expérience) et des modèles qui reproduisent les comportements de manière *ad hoc*. Ce sont généralement des lois simples, avec des paramètres ajustés sur l'expérience.

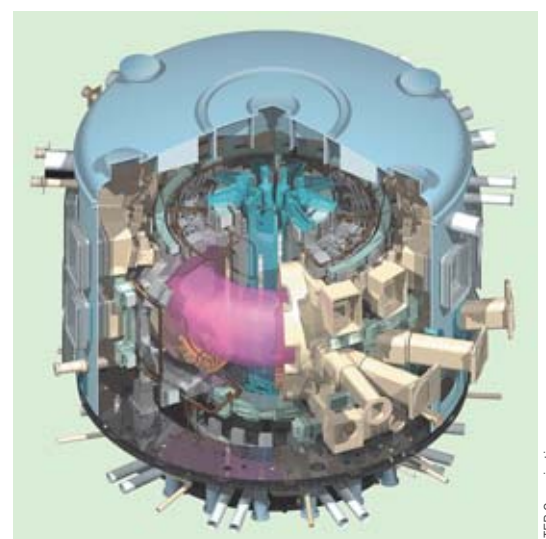
Les conclusions convergentes de l'expérimentation JET et de la modélisation ont confirmé la faisabilité scientifique de la fusion nucléaire par confinement magnétique et ont permis de déterminer la taille minimale que devait avoir un plasma dans un tokamak pour entretenir ses réactions de fusion. Cependant, le JET présentait deux limitations majeures. La première est liée à la taille même du réacteur, qui n'a pas permis d'atteindre, même s'il a été approché, le point de **breakeven**. La seconde provient de la conception du JET, qui interdit de consolider un tel résultat sur une durée suffisamment longue pour valider la solution à un réacteur électrogène.

Cette limitation de la durée du plasma a fait l'objet de toute l'attention du CEA, dont les équipes de l'Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique basé sur le Centre de Cadarache, avec la mise en service, dès 1988, de Tore Supra. C'est le seul tokamak européen combinant bobines de champ magnétique toroïdal **supraconductrices**, composants face au plasma activement refroidis et systèmes de puissance additionnelle adéquats, qui lui permettent d'étudier les problématiques de l'intégration d'un plasma de fusion dans un environnement stationnaire.

Les succès de fonctionnement fiable, de longue durée et à forte puissance injectée de Tore Supra, rendus possibles par des avancées combinées en physique, technologie et opération contrôlée en temps réel, associés aux performances du plasma du JET, ont abouti à la décision collective de construction d'**ITER** (**International Thermonuclear Experimental Reactor**) en 2005.



EFDA-JET



ITER Organization

Les tokamaks JET (à gauche) et ITER (à droite, vue éclatée ; le plasma chaud est représenté en rose). Installé au Culham Science Centre près d'Oxford (Royaume-Uni), JET a produit son premier plasma en 1983. Avec un poids de 2 800 tonnes, un volume de plasma de 90 m³ et un champ magnétique de 3,45 teslas, JET est à ce jour le plus grand des tokamaks. Son successeur, ITER, qui pèsera 23 000 tonnes pour un volume de plasma de 840 m³ et un champ magnétique de 5,3 teslas, a été conçu pour produire 400 MW de puissance à partir de 40 MW injectés.

ITER : des objectifs scientifiques ambitieux

Le programme ITER est porté par sept grands partenaires, la Chine, la Corée du Sud, les États-Unis, l'Europe, l'Inde, le Japon et la Russie, représentant la moitié de la population mondiale. L'Europe, qui héberge le projet en France, prend en charge à elle seule 45 % des investissements. Une Organisation internationale ITER a été créée pour assurer la réalisation du projet. Le CEA participe activement à la contribution française, laquelle combine des développements scientifiques et techniques sous la bannière d'Euratom aux activités de préparation de site et d'hébergement, confiées à l'Agence ITER France.

Trois grandes missions scientifiques sont assignées à ITER. La première concerne la production de plasmas de deutérium et de tritium pour lesquels l'énergie dégagée par la réaction de fusion soit de dix fois supérieure à l'énergie injectée nécessaire pour déclencher la réaction. Pour y parvenir, ITER a été conçu pour générer 400 MW d'énergie à partir de 40 MW de puissance additionnelle. Des données à comparer aux résultats obtenus avec le JET, où la puissance produite a atteint 16,5 MW pour une vingtaine de MW injectés. La réalisation de cet objectif imposera non seulement de confirmer que les extrapolations sont correctes mais fournira également des données majeures sur le comportement des plasmas, en matière de confinement et de stabilité.

Deuxième grande mission d'ITER : produire des plasmas de deutérium et de tritium tels que l'énergie dégagée par la réaction de fusion contribue de manière significative à l'entretien du processus, dans des conditions de durée préfigurant le fonctionnement d'un réacteur, c'est-à-dire des conditions approchant la stationnarité. Ceci exige des contraintes supplémentaires quant au maintien de la configuration magnétique elle-même, *via* des systèmes de puissance additionnelle adéquats.

Enfin, ITER permettra de tester des régimes proches de l'**ignition**, où l'on cherche à minimiser la puissance injectée totale en vue de mieux cerner les conditions (température, densité...) nécessaires et suffisantes pour assurer l'entretien des réactions de fusion dans un futur réacteur.

En lien avec ces missions scientifiques, ITER devra permettre à terme de conclure sur la faisabilité technologique du processus, c'est-à-dire si la fusion nucléaire par confinement magnétique est, ou non, un procédé pouvant conduire à une filière de réacteurs nucléaires totalement différents de ceux existant actuellement. Cet enjeu est pris avec le plus grand sérieux par tous les acteurs. L'organisation internationale ITER est ainsi chargée de proposer une machine qui devra remplir cette mission avec des protocoles expérimentaux qui devront être validés un par un par l'**Autorité de sûreté nucléaire (ASN)** avant toute mise en service et toute introduction du mélange deutérium-tritium dans la machine.

ITER devrait démarrer au début des années 2020 sans tritium pour une durée de cinq à sept ans. Puis, au terme d'une progression par étape, le réacteur devrait parvenir aux performances qui lui sont fixées. Lors de ces phases, l'ensemble des composants et des processus physiques seront constamment testés, modélisés



ITER Organization

et comparés aux prédictions, de manière intégrée et en vraie grandeur.

Vers une nouvelle filière électrogène

Les résultats, s'ils sont ceux escomptés aujourd'hui, permettront de valider la fusion nucléaire par confinement magnétique comme un processus suffisamment mûr pour que soit déclenchée la phase suivante, à savoir la conception d'un prototype industriel, le réacteur de démonstration DEMO. Cette étape devra en particulier satisfaire aux critères d'industrialisation, de durée de vie d'exploitation et d'efficacité de production électrique qui sont ceux d'un réacteur. Tous les partenaires d'ITER démarrent ainsi des études conceptuelles dans ce sens et, parallèlement à leur contribution au fonctionnement d'ITER, envisagent déjà les étapes de recherche et développement nécessaires. Les instituts de recherche européens impliqués commencent également à se mettre en ordre de bataille au sein du programme Euratom. Même s'il est probable que le premier tokamak de la génération DEMO voie le jour en Asie, l'Europe travaille à proposer une solution issue de son savoir-faire scientifique et industriel, avec ses propres exigences de qualité. L'horizon prévisible à la deuxième moitié du XXI^e siècle pour une telle filière n'inscrit pas encore la fusion nucléaire par confinement magnétique dans le besoin d'adaptation de notre mix énergétique aux exigences environnementales du moment. Toutefois, le maintien d'un programme volontaire et ambitieux de recherche et développement à l'échelle planétaire permettra à terme de proposer une nouvelle solution de production massive d'électricité pérenne et responsable en matière de respect de l'environnement.

> Alain Bécoulet

Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (IRFM)
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Cadarache

Le chantier ITER à Cadarache (Bouches-du-Rhône). Entouré d'un béton armé spécial, le tokamak ITER reposera sur des patins parasismiques disposés en étoile.

L'ensemble du site sera en outre équipé de capteurs qui enregistreront toute activité sismique, aussi minime soit-elle.

POUR EN SAVOIR PLUS

« L'énergie des étoiles - La fusion nucléaire contrôlée », Paul-Henri REBUT, Éditions Odile Jacob, 1999, 285 pages.

« ITER, le chemin des étoiles », Robert ARNOUX et Jean JACQUINOT, Édisud, 2006, 190 pages.

« Nuclear Fusion: Half a century of magnetic confinement of fusion research », Cornelis M. BRAAMS, Peter E. STOTT, IoP, 2002, 327 pages.



La consommation d'énergie primaire en France repose à plus de 50 % sur les énergies fossiles, le pétrole, le charbon et le gaz. Présentes en quantités limitées sur notre planète et de plus en plus coûteuses, ces énergies sont de surcroît fortement émettrices de gaz à effet de serre (GES). Dans ce contexte, le plan européen sur le climat et le Grenelle de l'environnement ont fixé des objectifs clairs : d'ici à 2020, la France doit réduire de 20 % ses émissions de GES et couvrir 23 % de ses besoins énergétiques avec des énergies renouvelables. Des objectifs auxquels le CEA consacre une part significative de ses travaux de recherche et développement, tels ceux menés dans le domaine de l'énergie solaire. Améliorer la productivité des technologies photovoltaïques, et faire ainsi baisser leurs coûts, constitue l'un des grands axes de ces travaux. **Ces derniers portent non seulement sur la production de matériaux et la mise au point de procédés de fabrication plus performants, mais aussi sur le développement de produits ou de systèmes pour l'intégration du photovoltaïque dans les bâtiments.** Avec, en ligne de mire, un transfert des progrès réalisés vers le marché qui soit le plus rapide possible.

Le solaire photovoltaïque

Technologies photovoltaïques et production centralisée d'électricité

Depuis leurs premiers développements, dans les années cinquante, les technologies photovoltaïques ont connu des avancées spectaculaires. Avec les progrès attendus d'ici à 2020, le coût du kWh photovoltaïque devrait passer sous la barre des 10 centimes d'euro, rendant concurrentiel ce mode de production de l'électricité.



Caractérisation électrique d'une cellule photovoltaïque en silicium cristallin.

Découvert en 1839 par le physicien français Antoine Becquerel⁽¹⁾, l'effet **photovoltaïque** consiste à transformer directement l'énergie rayonnée par le soleil en électricité à courant continu. Sa première application est née en 1956 pour l'alimentation des satellites, sur la base de **cellules photovoltaïques** au **silicium**. Ces dernières ont été mises au point aux États-Unis dans les laboratoires Bell, lors de recherches sur les transistors. Les premiers développements terrestres à grande échelle se produisent dans les années quatre-vingt pour l'alimentation électrique de sites isolés, avec des usages professionnels comme le balisage ou les radio-émetteurs, et des usages domestiques tels que l'éclairage, l'audiovisuel

et le pompage. Les centrales photovoltaïques pour la production d'électricité sur les réseaux électriques apparaissent quant à elles à partir des années quatre-vingt-dix. Elles utilisent des **onduleurs** pour convertir le courant continu en courant alternatif, d'abord dans des unités de quelques **kW** en Suisse et en Allemagne, puis à l'échelle du **MW**. À l'heure actuelle, les installations les plus puissantes atteignent les 100 MW et, dans les pays de la Sunbelt⁽²⁾, certains projets sont annoncés dans la gamme du **GW**. La fiabilité des capteurs ou **panneaux solaires photovoltaïques** est l'un des facteurs-clés de cette expansion par niches de marché progressives : plusieurs des technologies employées dans les années quatre-vingt fonctionnent encore de nos jours, faisant la démonstration de durées de vie supérieures à trente ans et d'un besoin d'entretien particulièrement faible.

Un marché qui devient concurrentiel

Les progrès technologiques et économiques réalisés au cours des trois dernières décennies ont été particulièrement impressionnants. Au début des

(1) Antoine Becquerel (1788-1878) : outre la découverte de l'effet photovoltaïque et l'invention de la pile photovoltaïque, on lui doit notamment la découverte de l'effet piézoélectrique et du diamagnétisme. Il est le grand-père d'Henri Becquerel, découvreur de la **radioactivité**.

(2) Sunbelt : la Sunbelt, ou ceinture du soleil, comprend l'ensemble des 148 pays situés entre le 35° degré de latitude nord et le 35° degré de latitude sud. Elle représente environ 75 % de la population mondiale et 40 % de la demande mondiale en électricité.



Four pour la cristallisation du silicium. Le silicium est chauffé jusqu'à sa température de fusion. Au cours du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en formant un cristal unique de grande dimension (silicium monocristallin) ou plusieurs cristaux (silicium polycristallin). Les lingots de silicium sont découpés en tranches très fines (épaisseur de l'ordre de 200 microns) appelées *wafers* (galettes en anglais), constitutives des cellules photovoltaïques.

années quatre-vingt, le **watt-crête (Wc)** issu d'usines produisant alors quelques MW par an, telles celles des sociétés RTC et Photowatt à Caen (Calvados) et France-Photon à Angoulême (Charente), coûtait 100 Francs, soit 15 €/W hors inflation (donc beaucoup plus en tenant compte de l'inflation). Aujourd'hui, toutes technologies confondues, hormis le photovoltaïque à concentration (voir *Le photovoltaïque à concentration*, p. 38), les **modules photovoltaïques** sont disponibles pour un coût de revient de 0,6 à 1,2 €/W. En valeur courante, cela correspond à une division de ce coût par un facteur supérieur à 10 en trente ans. Le prix de l'électricité photovoltaïque est ainsi compris entre 0,10 et 0,20 €/kWh, selon la taille des systèmes et les régions⁽³⁾. En se basant sur les progrès déjà accomplis dans la décennie en cours, on peut estimer que ces prix descendront entre 0,05 et 0,10 €/kWh en 2020 et, qu'à partir de 2030, l'électricité photovoltaïque sera quasiment partout inférieure à 0,05 €/kWh.

Le franchissement en cours de la barrière des 0,10 €/kWh, avec les ensoleillements les plus favorables, est en train d'ouvrir des marchés considérables, non seulement en Europe du Sud, mais aussi dans les pays de la Sunbelt tels que le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord (MENA pour *Middle East and North Africa*), l'Inde, la Chine et le Chili, et en particulier ceux où l'électricité conventionnelle a un prix élevé (fabrication par groupe électrogène par exemple). Autre avantage important, à la différence des énergies non renouvelables, l'absence de coûts opérationnels rattachés à tout combustible se traduit par des prix fixes liés principalement à l'amortissement des investissements initiaux sur la durée de vie des capteurs et

des systèmes associés (20 à 40 ans pour l'instant). Désormais, pour tout consommateur, investir dans de tels générateurs photovoltaïques revient à assurer une partie de ses dépenses énergétiques contre les augmentations tarifaires.

Trois grandes filières technologiques

L'éventail des technologies photovoltaïques est large, mais il a finalement peu évolué au fil du temps. Toutes les technologies commercialisées ou en développement aujourd'hui étaient déjà l'objet de fabrication ou de recherche dans les années quatre-vingt. Elles peuvent se classer en trois filières :

- les *cellules à silicium massif*, qui constituent la technologie de référence, avec l'utilisation de plaquettes mono-, quasi-mono- et polycristallines de 100 à 300 **microns** d'épaisseur ;
- les *cellules à couches minces*, qui sont élaborées en déposant une ou plusieurs couches **semi-conductrices** et photosensibles, d'une épaisseur de un à quelques microns, sur un support. Elles sont réalisées à partir de **silicium amorphe**, de composés cuivre-indium-sélénium (CIS), cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS) ou cuivre-indium-gallium-soufre-sélénium (CIGSSe), de tellurure de cadmium (CdTe), de molécules organiques et de colorants⁽⁴⁾ ;
- les *cellules à concentration*, à base de matériaux comme l'arséniure de gallium GaAs, qui délivrent des hauts rendements, mais qui impliquent l'emploi de concentrateurs optiques et de **trackers** pour suivre la course du soleil.

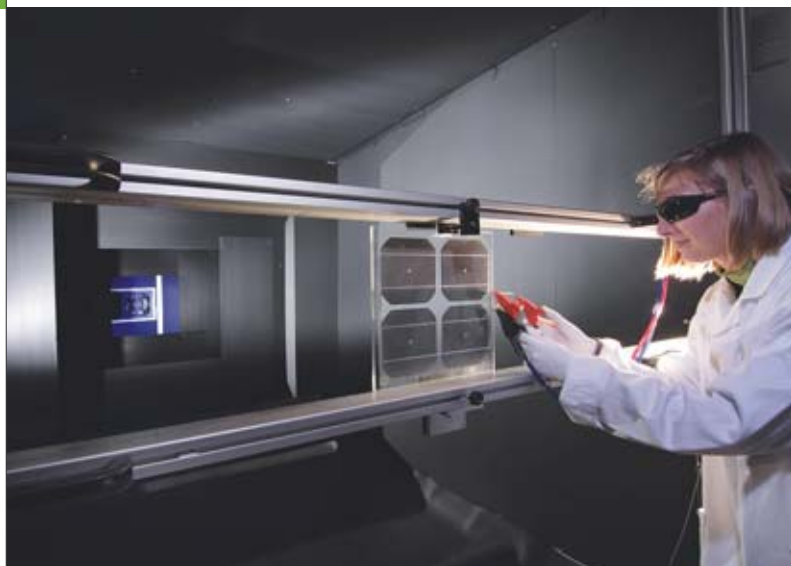
Force est de constater que les améliorations ont partout été régulières et graduelles, même si certaines étapes du développement des nombreux procédés mis en œuvre ont quelquefois donné lieu à de véritables ruptures technologiques.

(3) À titre de comparaison, le prix du kWh pour les usages domestiques en France est de 0,099 €, contre 0,128 € pour l'Union européenne à 27 (Source : Eurostat, données 2011).

(4) Cellule à colorant : cellule constituée d'une monocouche colorée pour l'absorption des photons, d'un semi-conducteur pour le transport des électrons et d'un **électrolyte** pour le transport des charges.



La lamination, une des étapes de fabrication des modules photovoltaïques. Cette opération consiste à chauffer les modules (cellules photovoltaïques et matériaux encapsulants) tout en les pressant grâce à un vide partiel pour évacuer tout gaz résiduel.



P. Avavian/CEA

Flash test réalisé sur un module photovoltaïque pour déterminer sa puissance maximale.

Dans un marché en pleine croissance, avec des volumes de production annuels multipliés par un facteur 1 000 (de 20 MW en 1980 à plus de 20 GW en 2011), les parts de marchés des diverses filières sont restées globalement stables, avec une part oscillant autour de 85-90% pour le seul **silicium cristallin**. Le silicium amorphe a longtemps été son challenger principal, puis le CdTe et le CIGS. L'organique et le photovoltaïque à concentration se développent sur des niches de marché tout à fait spécifiques.

Dans cette vaste palette technologique, le CEA a choisi de s'impliquer plus fortement sur la technologie dominante, le silicium, qui présente encore de multiples potentiels d'amélioration, tout en contribuant aux deux autres filières, les couches minces, avec l'organique et le CIGS, et le photovoltaïque à concentration.

(5) Énergie grise: quantité d'énergie consommée au cours du cycle de vie d'un matériau ou d'un produit, de l'extraction de la matière première jusqu'à sa destruction ou son recyclage.



L. Chamussy/Sipa-CEA

Banc d'essai comparatif de différentes technologies photovoltaïques. Les modules sont en cours d'installation.

Les enjeux technologiques

De multiples critères sont pris en compte pour évaluer les technologies photovoltaïques: le **rendement**, l'énergie grise⁽⁵⁾ et le temps de retour énergétique, le taux de vieillissement et la durée de vie, la présence de matériaux toxiques ou rares, la recyclabilité, la flexibilité ou la conformabilité des matériaux, etc. Cependant, jusqu'à présent, le coût de revient de la puissance nominale en €/W ou de l'énergie produite en €/kWh pour un ensoleillement donné reste déterminant.

L'évaluation de ce coût, au niveau d'un système ou d'une centrale photovoltaïque, doit prendre en considération tous les autres postes de dépenses au-delà des panneaux solaires: les supports et éventuellement leurs fondations, l'installation, le câblage, l'électronique de conversion, de monitoring et de gestion de l'électricité, le transformateur et les dispositifs de raccordement sur le réseau électrique ou les systèmes de stockage associés selon les applications. Le coût du financement, des assurances qui y sont liées, voire même des démarches administratives complexes dans certains pays, constituent une autre part importante des coûts complets de l'électricité photovoltaïque.

La pression sur les coûts de revient est telle que tous les maillons de la chaîne de la valeur doivent être traités simultanément et ce pour toutes les filières:

- la production des matériaux de ressource aussi purifiés que possible et au moindre coût. Cette bonne maîtrise des impuretés de tous les intrants est l'une des clés de la réussite;
- les procédés à haute productivité pour la cristallisation et la mise en forme des matériaux, la réalisation des cellules photovoltaïques, l'encapsulation des modules ou la fabrication des modules à couches



P. Avavian/CEA

Module photovoltaïque à couches minces. Outre sa très forte implication sur la filière silicium, le CEA mène de nombreuses études sur la technologie couches minces.

minces. Sur la plupart des étapes, l'enjeu est de faire croître les productivités du m^2/min au m^2/s ;

- les structures support, la pose et, dans le futur, le développement de composants d'enveloppes du bâtiment directement photovoltaïques (voir *Production décentralisée d'électricité : le solaire intégré au bâti*, p. 36) qui faciliteront l'installation, voire la fondront parmi les autres postes de couverture et d'isolation ;
- le câblage, la conversion de l'électricité, les protections électriques et le monitoring.

Gérer la fourniture d'électricité photovoltaïque

Valoriser au mieux cette électricité, dont une des caractéristiques est la variabilité de la puissance disponible, constitue un enjeu de taille. La ressource solaire photovoltaïque est plutôt bien en phase avec la pointe de consommation électrique due à l'activité diurne, qui représente en France 10 à 20 GW selon les saisons.

Pour l'instant, les dispositifs incitatifs de tarifs d'achat de l'électricité solaire à prix fixes ne poussent à aucune gestion particulière. Cependant, à terme, il sera possible d'assurer des services complémentaires d'énergie et de puissance garanties en combinant plusieurs thèmes sur lesquels le CEA travaille : la prédiction des puissances à 24 heures, quelques heures, voire quelques minutes, l'analyse du foisonnement géographique qui, sur une ou plusieurs régions, permet de garantir une puissance minimale de la ressource solaire, et l'association avec des actions de gestion de la demande d'électricité et des systèmes de stockage, pour contribuer activement à l'équilibre entre l'offre et la demande sur les réseaux. Une excellente synergie apparaît, en vue d'une optimisation globale du système énergétique, avec l'émergence des bâtiments à énergie positive⁽⁶⁾ et des véhicules électriques.

Pour l'ensemble de la filière photovoltaïque, il s'agit donc de travailler d'une part, sur les matériaux et les procédés de fabrication et, d'autre part, sur l'ingénierie des systèmes – bâtiments (voir *Améliorer la performance énergétique de l'habitat*, p. 88), transport électrique (voir *La mobilité solaire*, p. 76), réseaux (voir *Smart grids : quand les réseaux électriques deviennent intelligents*, p. 71) – de la conception à l'exploitation. Au sein de l'**Ines (Institut national de l'énergie solaire)**, le CEA mobilise près de 300 personnes. Elles interviennent dans des laboratoires disposant des équipements appropriés pour l'ensemble des étapes de production, de caractérisation et de vieillissement accéléré ainsi que des outils de modélisation. Le travail en partenariat avec les industriels du secteur favorise les développements directement sur des équipements à l'échelle 1, d'où une grande réactivité sur les transferts de savoir-faire et de technologies, et par conséquent une répercussion des améliorations techniques et des baisses de coûts au plus vite sur le marché.

> Philippe Malbranche

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Grenoble (Site Ines)



Solaredirect

Parc solaire photovoltaïque des Mées dans les Alpes-de-Haute-Provence. Équipé de 105 000 panneaux photovoltaïques déployés sur 50 ha, sa puissance est de 24 MWc. La production est de 34 GWh, soit l'équivalent de la consommation annuelle de 22 342 habitants. Ce parc a été mis en exploitation en février 2011.



EDF Médiathèque/Philippe Eranian



EDF Médiathèque/William Beaucardet



FranceWatts



Solaredirect

Des exemples d'intégration du photovoltaïque dans le bâti. En haut à gauche, intégration en façade. La façade de la Société d'économie mixte de Nice (Alpes-Maritimes) est recouverte de panneaux photovoltaïques. En haut à droite, intégration en toiture. Vue des panneaux photovoltaïques sur le toit du stade Geoffroy Guichard de Saint-Étienne (Loire). En bas à gauche, intégration en toiture complète. Le toit est recouvert de tuiles photovoltaïques. En bas à droite, intégration de 12 000 m^2 de panneaux photovoltaïques sur la toiture de l'usine Rhodia Belle Étoile (Rhône). L'installation délivre une puissance de 2 MWc.

(6) Bâtiment à énergie positive : bâtiment qui produit plus d'énergie qu'il n'en consomme.



Production décentralisée d'électricité : le solaire intégré au bâti

L'amélioration de l'efficacité énergétique de l'habitat – dépendant à plus de 50 % des énergies fossiles et responsable de près du quart des émissions de gaz à effet de serre – est l'un des enjeux majeurs du Grenelle de l'environnement. Elle passe notamment par l'intégration de systèmes photovoltaïques dans les bâtiments.



Bancs d'essais de systèmes PV intégrés en toiture de la plateforme expérimentale Incas. L'objectif est de comprendre les phénomènes électriques et thermiques engendrés par l'intégration de modules PV en toiture, d'évaluer les performances de l'installation et de trouver les moyens d'optimiser les rendements électriques.

Les **modules photovoltaïques** (PV) permettent de convertir l'énergie solaire en électricité. Aujourd'hui, les **rendements de conversion** dépassent les 20 % pour les meilleures technologies. L'énergie solaire étant abondante, mais diffuse, et la taille des installations photovoltaïques pouvant être relativement petite sans affecter le rendement de production (quelques **kW**), il est intéressant de rapprocher la production électrique photovoltaïque du lieu de consommation. Une production décentralisée sur le toit ou la façade de nos bâtiments offre l'avantage d'utiliser des surfaces déjà existantes tout en réduisant les pertes électriques liées au transport. Ainsi, selon une étude européenne réalisée par l'**EPPIA** (**European Photovoltaic Industry Association**), 40 % des toits et 15 % des façades des bâtiments en Europe pourraient être équipés de systèmes photovoltaïques. Autrement dit, il serait possible de mettre en place des modules PV d'une puissance supérieure à 1 500 **GWc**, donc en mesure de produire 1 400 **TWh**, soit environ 40 % de la demande domestique en électricité en 2020.

Des modes d'intégration diversifiés

En 2006, la France a souhaité favoriser le développement d'une filière industrielle de production de **panneaux photovoltaïques**, en privilégiant notamment l'intégration au bâti. Dans cette optique, les tarifs d'achat par **ERDF** (**Électricité réseau distribution France**) ou par les **ELD** (**Entreprises locales de distribution**)⁽¹⁾ de l'énergie ainsi produite avaient alors été sensiblement augmentés, avec une surprime pour l'intégré. Depuis, les tarifs ont évolué à la hausse puis à la baisse en plusieurs fois et de façon notable.

À ce jour, on compte neuf tarifs différents en fonction du mode d'intégration et du type d'usage des bâtiments. Cette incitation a conduit de nombreux fabricants à concevoir et à commercialiser des systèmes PV intégrés au bâti. Ces derniers présentent plusieurs modalités d'intégration en toiture et en façade de bâtiment.

L'intégration en toiture

Trois catégories de produits peuvent être distinguées :

- les **produits de type tuiles**, pour lesquels les modules PV sont intégrés dans des supports qui remplacent la tuile, l'ardoise ou le support de couverture classiquement utilisé. Dans ce cas, aucun **abergement**⁽²⁾ spécifique n'est à prévoir ;
- les produits permettant d'intégrer des modules standards. Deux sortes de systèmes sont proposées. D'une part, des **systèmes intégrés simplifiés**, bénéficiant d'un tarif d'achat de l'électricité dit « intégration simplifiée au bâti », dont l'étanchéité est réalisée par une membrane, un bac en acier étant placé sous l'ensemble des modules. La suppression du module n'affecte pas le maintien de l'étanchéité. D'autre part, des systèmes pour lesquels l'étanchéité est assurée à l'interface entre deux modules. Dans ce cas, l'étanchéité n'est plus garantie lorsque le module est enlevé. L'électricité produite par ces **systèmes intégrés** bénéficie du tarif d'achat dit « intégration au bâti » le plus élevé ;
- les **modules PV intégrés sur des membranes**.

Dans la plupart des cas, ces produits sont fabriqués à partir de modules souples en **silicium amorphe**. Ils permettent de recouvrir à moindre coût de grandes surfaces pratiquement planes (hangar, bâtiment logistique, toiture de centre commercial...).

L'intégration en façade

Différents systèmes permettent d'intégrer des modules PV, opaques ou semi-transparents. En position verticale sur la façade, les modules seront placés en allège⁽³⁾, en garde-corps de balcon ou de fenêtre, en remplacement de vitrage, en double peau⁽⁴⁾, en mur-rideau⁽⁵⁾... Au-dessus d'une fenêtre, les modules pourront être positionnés en brise-soleil, mobile ou non. Cela présente le double avantage d'avoir un meilleur angle de captation de l'énergie solaire et de protéger le bâtiment contre les surchauffes d'été.

(1) ELD : fournisseur d'électricité ou gestionnaire de réseau de distribution d'électricité qui a conservé ses prérogatives sur son territoire de desserte, généralement municipal, lors de la nationalisation des fournisseurs d'électricité en 1946.

(2) Abergement : élément permettant d'assurer l'étanchéité entre deux ouvrages du bâti. Par exemple, les pièces de zinguerie entre la souche de cheminée et les tuiles.

(3) Allège : partie du mur (intérieur ou extérieur) située entre le plancher et l'appui de fenêtre.



Exemple d'intégration en double peau de modules PV bifaciaux à haut rendement. Dans ce type d'intégration en façade, la paroi du bâtiment est doublée d'une seconde paroi vitrée dans laquelle sont intégrés des modules PV. L'espace entre les deux parois est rempli d'air.

Des voies d'amélioration

Le photovoltaïque intégré au bâti offre un grand nombre de combinaisons possibles selon la technologie retenue (**silicium cristallin**, silicium amorphe, couches minces, organique, voir *Technologies photovoltaïques et production centralisée d'électricité*, p. 32) et le système d'intégration. De nombreux travaux de R&D, notamment sur les aspects énergétiques, doivent encore être menés pour développer cette solution.

Les installations photovoltaïques intégrées au bâti étant principalement connectées au réseau, il est essentiel de gérer intelligemment ces flux d'énergie qui fluctuent de façon importante en fonction de l'heure et de la météorologie. Il s'agit non seulement de faire coïncider au maximum production et consommation, mais également de stocker l'énergie solaire excédentaire. D'où l'intérêt du développement des smart grids au niveau du bâtiment et du quartier (voir *Smart grids: quand les réseaux électriques deviennent intelligents*, p. 71).

Des travaux sont également en cours afin d'évaluer et de garantir la production électrique photovoltaïque au niveau des bâtiments. Cela implique de déterminer précisément la production et la durée de vie des installations. Deux problèmes principaux se posent. Le premier est lié aux pertes par ombrage des modules PV. En effet, les bâtiments se trouvant essentiellement en milieu urbain, de nombreux objets (autres bâtiments, poteaux, arbres...) peuvent créer des ombrages nuisant à la production. Il convient alors de proposer de nouvelles architectures électriques au niveau de l'aménagement pour réduire de façon significative l'impact de ce phénomène.

Le second problème est rattaché à la température des modules. En effet, plus celle-ci augmente, plus le rendement diminue. Pour les technologies mettant en œuvre du silicium cristallin, un accroissement de 10°C réduit d'environ 4% la production. Une plateforme « intégration solaire dans le

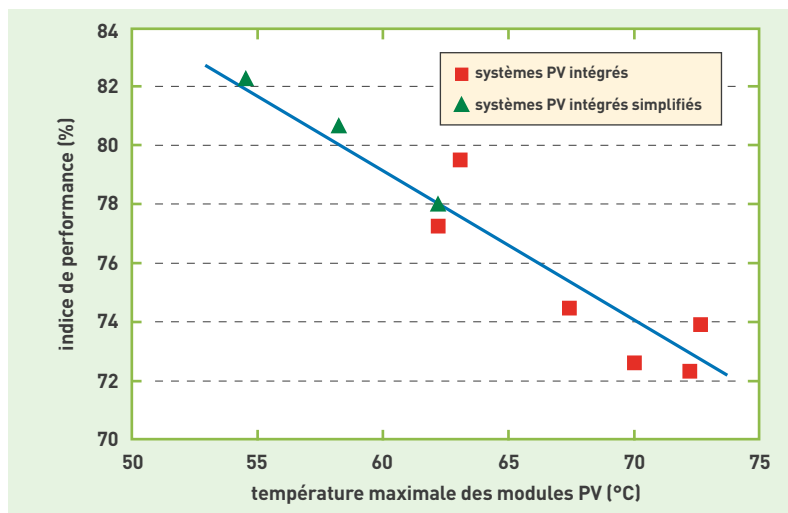


Figure.

Détermination de la performance d'une installation PV testée sur la plateforme Incas. L'indice de performance de systèmes PV intégrés et de systèmes PV intégrés simplifiés est calculé en fonction de la température maximale observée au niveau des modules lors d'une journée de fort ensoleillement de juin 2011. Un écart de plus de 15°C apparaît entre les systèmes les plus performants (intégrés simplifiés) et les moins performants (intégrés). Cet écart de température, qui influe sur la production, est lié à une moins bonne ventilation de la face arrière des modules ainsi qu'à leur couleur foncée, d'où une tendance à être plus chauds.

bâtiment» permettant de tester les systèmes PV intégrés en toiture a été réalisée sur la plateforme Incas (Instrumentation de nouvelles constructions d'architecture solaire) de l'Ines (Institut national de l'énergie solaire) en vue d'étudier cet aspect. Elle comprend 10 bancs représentant un élément de toiture de 35 m² fortement isolée. Après un an d'essais, il apparaît que les systèmes intégrés en toiture sont globalement moins performants que les systèmes intégrés simplifiés (figure).

Par ailleurs, pour plusieurs installations intégrées au bâti, tels certains aménagements de façade ou les systèmes hybrides photovoltaïques thermiques (PV/Th), il est nécessaire d'avoir une vision plus large que la simple production électrique. En effet, ces équipements auront un impact sur l'énergétique globale du bâtiment. C'est le cas par exemple des vitrages photovoltaïques semi-transparents, qui vont réduire l'apport solaire et donc augmenter le besoin de chauffage l'hiver, diminuer le besoin de climatisation l'été et accroître le besoin en éclairage. Il importe donc de développer des méthodes permettant d'évaluer non seulement la production photovoltaïque, mais aussi l'impact sur la consommation de chauffage ou de climatisation et sur l'éclairage.

Le CEA s'emploie activement à développer l'ensemble de ces axes d'amélioration des systèmes PV intégrés au bâti. De plus, les équipes travaillent à mettre au point des éléments multifonctionnels de toiture ou de façade qui intègrent en préfabrication les systèmes PV, permettant ainsi de réduire les coûts de mise en œuvre et de maîtriser le niveau de qualité. Un projet de start-up est d'ailleurs en cours d'étude sur ce sujet.

> Benjamin Boillot

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Grenoble (Site Ines)

(4) Double peau: deuxième paroi située à l'extérieur de la première paroi.

(5) Mur-rideau: mur de façade qui assure la fermeture de l'enveloppe du bâtiment sans participer à sa stabilité. Les panneaux photovoltaïques sont donc appuyés, étage par étage, sur un squelette fixe. Il s'agit d'un type de façade légère.



Le photovoltaïque à concentration

Avec des rendements de conversion de l'énergie solaire qui peuvent atteindre plus de 43 %, le photovoltaïque à concentration, de développement plus récent que le photovoltaïque classique, est à même d'offrir une solution intéressante dans les régions à fort ensoleillement.



Système de panneaux photovoltaïques à moyenne concentration (MCPV) de la société Axiosun déployé dans le sud de la France. Les systèmes MCPV utilisent des trackers à un axe, orienté ici est-ouest. Les miroirs, qui concentrent la lumière sur les modules CPV, sont bien visibles. Ces derniers sont collés à des dissipateurs de chaleur à ailettes pour limiter l'augmentation de la température au niveau des cellules.

Parmi les technologies de production de l'énergie basées sur le solaire **photovoltaïque**, le photovoltaïque à concentration (CPV pour *Concentration PhotoVoltaic*) est l'une des moins connues. Cependant, il entre rapidement dans le circuit des énergies renouvelables. Le concept repose sur l'emploi de systèmes optiques qui permettent de concentrer la lumière du soleil sur des **cellules photovoltaïques** possédant un **rendement de conversion** élevé (figure).

Améliorer la conversion de l'énergie solaire

Les recherches autour du CPV ont été initiées dans l'optique d'accroître le rendement des cellules solaires. Dans un article fondateur paru en 1961⁽¹⁾, le physicien américain William Shockley et son collègue allemand Hans J. Queisser établissent que le rendement de conversion maximum des cellules photovoltaïques **simple jonction**, sous un flux lumineux de 1000 W/m^2 , est d'environ 30 %. Ce flux constitue la valeur standard d'éclairement utilisée pour la mesure des performances des cellules photovoltaïques. Il correspond à la valeur de l'éclairement solaire. Dans le même article, les deux chercheurs posent la première brique du concept de CPV. En effet, selon

(1) « Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells », William SHOCKLEY et Hans J. QUEISSER, *Journal of Applied Physics*, 32, issue 3, 1961, p. 510-519.

(2) X : taux de concentration de la lumière arrivant sur une cellule photovoltaïque après avoir été concentrée par un système optique.

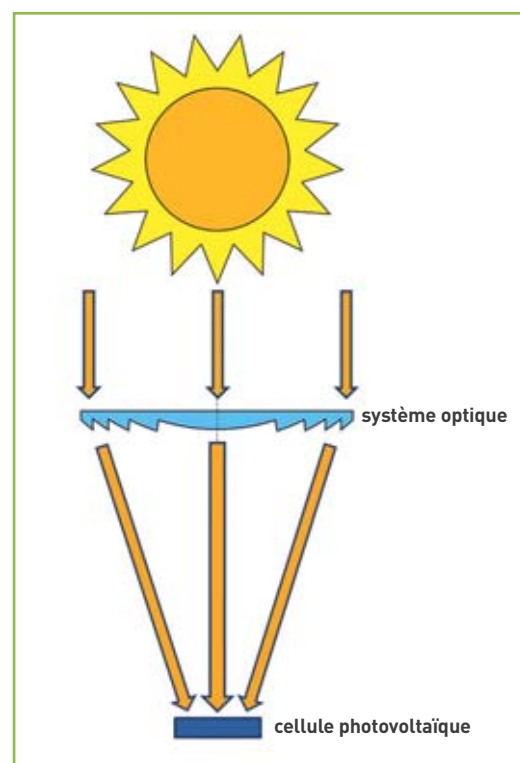


Figure. Schéma de principe du photovoltaïque à concentration. La lumière du soleil est concentrée sur une cellule photovoltaïque de petite taille grâce à un système optique.

leurs calculs, le rendement devrait augmenter avec l'intensité lumineuse incidente sur la cellule.

La validité des prédictions de Shockley et Queisser est démontrée en 1987, quand l'université de Stanford (États-Unis) bat, avec une même cellule, deux records du monde en matière de rendement de conversion de cellules solaires à base de **silicium** : 20 % de rendement pour un éclairage de $1X^{(2)}$ (soit $1\,000\text{ W/m}^2$) et 27 % de rendement pour un taux de concentration de 140X, soit 140 fois l'intensité lumineuse du soleil. Les technologies CPV exploitent donc la possibilité des cellules photovoltaïques de travailler sous un flux lumineux plus intense avec des rendements de conversion plus élevés. Il est important de noter que l'emploi de systèmes optiques implique que les **modules** CPV soient constamment orientés vers le soleil. Cette fonction est assurée par des appareils de suivi de la course du soleil, les **trackers**, dont la complexité technologique et le besoin en précision vont de pair avec le taux de concentration.

Les procédés de concentration

Les différentes technologies CPV disponibles peuvent être distinguées selon leur taux de concentration du flux lumineux. Elles comprennent :

- les *technologies à basse concentration* (LCPV pour *Low Concentration PhotoVoltaic*), entre 2X et 10X, s'appuyant généralement sur des **panneaux photovoltaïques** classiques à base de **silicium cristallin** et des assemblages de miroirs simples accolés aux modules photovoltaïques. Le taux maximal de concentration est limité à 10X. En effet, au-delà, la lumière diffuse n'est plus collectée par ces systèmes. Le principal problème posé par cette technologie réside dans l'utilisation de panneaux photovoltaïques conventionnels, car peu de fabricants de modules classiques maintiennent leurs garanties dans le cas d'un usage sous un flux lumineux concentré ;
- les *technologies à moyenne concentration* (MCPV pour *Medium Concentration PhotoVoltaic*), entre 10X et 100X, qui réclament des récepteurs spécifiques. La conversion photovoltaïque est toujours assurée par des cellules à haut rendement, à base de silicium cristallin. Ces systèmes nécessitent des cellules solaires dont le rendement de conversion se maintient à un niveau élevé avec la concentration du flux lumineux et l'augmentation de température qui en résulte. Le mode de concentration du flux lumineux reste basé sur des miroirs. Pour des taux de concentration supérieurs à 100X, les trackers à un axe de rotation ne suffisent plus ;
- les *technologies à haute concentration* (HCPV pour *High Concentration PhotoVoltaic*), qui sont employées pour des taux de concentration supérieurs à 100X. Elles reposent souvent sur des lentilles de Fresnel et des cellules à base de matériaux III-V (matériaux binaires, ternaires, quaternaires ou plus, composés des éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau de Mendeleïev). Le tracker demande alors un suivi sur deux axes.

Des rendements élevés

Aujourd'hui, les cellules à base de silicium exploitées dans le CPV permettent d'atteindre des rendements de conversion de 27,6 %. Les dernières technologies de cellules à base de matériaux III-V offrent quant à



AXIOSUN

elles des rendements de conversion de 43,5 %, rendements qui augmentent de 1 % par an depuis 1999. Pour les produits industriels, certains fabricants vendent des modules présentant des rendements de conversion d'environ 34 %, contre en moyenne 18 % pour les modules photovoltaïques classiques à base de silicium. Des chiffres qui font rêver, mais qui doivent être appréciés à la lumière d'autres aspects du CPV. Du fait de l'utilisation de systèmes optiques, les modules CPV ne captent que la lumière solaire directe. Il n'y a donc que peu, voire pas, de production lors de passages nuageux ou en cas de ciel totalement couvert. Ces équipements sont ainsi destinés à des zones à fort ensoleillement, pourtour méditerranéen par exemple. Par ailleurs, les trackers comportent des composants mécaniques mobiles, critiques pour la production d'énergie. Si ces composants confèrent aux systèmes CPV une courbe de production d'énergie au cours de la journée beaucoup plus intéressante, leur présence augmente la probabilité de panne sur les installations CPV.

Les systèmes CPV, qui n'ont pas encore bénéficié de l'effet de production de masse dont a profité le photovoltaïque, sont plus chers que les installations classiques. L'accroissement de leur production leur confère néanmoins un retour sur investissement plus rapide lorsqu'ils sont employés dans de grandes centrales de production d'énergie. Celles-ci constituent d'ailleurs leur marché principal. Si le nombre de grands fabricants se compte encore sur les doigts d'une main, il n'en reste pas moins que près de 700 MW de CPV ont été installés en 2012 et sont opérationnels.

Au niveau du CEA, de nombreuses compétences pluridisciplinaires se développent autour du CPV. En effet, dans ce domaine d'activité, les thématiques abordées sont variées et les chercheurs sont impliqués sur la recherche et développement autour de la thermique, de l'optique, de la physique des **semi-conducteurs** et des procédés d'assemblage, ou encore de la mécanique ou de la gestion de l'énergie.

> Mathieu Baudrit

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Grenoble (Site Ines)

Module photovoltaïque à moyenne concentration (MCPV) de la société Axiosun. On y voit les cellules à base de silicium, les dissipateurs de chaleur et le flux lumineux incident sur les cellules en provenance du miroir.



Si l'utilisation par Archimède de miroirs ardents pour brûler la flotte romaine attaquant Syracuse est sujette à caution, il n'en demeure pas moins que l'intérêt de concentrer le rayonnement solaire à l'aide de miroirs pour produire de l'énergie est connu depuis l'Antiquité. C'est ce principe qui est exploité aujourd'hui dans les centrales solaires thermodynamiques à concentration.

À la différence des systèmes photovoltaïques qui convertissent l'énergie solaire directement en électricité, ces centrales génèrent de la chaleur, laquelle est ensuite transformée en énergie électrique. La technologie, qui avait fait ses preuves dans les années quatre-vingt, connaît depuis 2000 un regain d'intérêt face aux défis environnementaux (diminution des gaz à effet de serre), au coût des énergies fossiles et à leur raréfaction prévisible. En 2012, la puissance installée totale des centrales solaires thermodynamiques à concentration s'est ainsi élevée à 2 GW. Une puissance qui, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), sera de l'ordre de 20 GW en 2020 pour atteindre 1 000 GW en 2050.

Le solaire à concentration : l'autre alternative pour la production d'électricité

Concentrer l'énergie du soleil

Basées sur l'exploitation du rayonnement solaire concentré à l'aide de champs de miroirs, les centrales solaires thermodynamiques à concentration permettent de chauffer des fluides à des températures susceptibles d'atteindre les 800 °C. Associées à des systèmes de stockage de la chaleur, elles peuvent être utilisées non seulement pour la production d'électricité 24 heures sur 24, mais aussi pour le chauffage, le dessalement de l'eau ou la fabrication d'hydrogène.



Boucles de capteurs solaires thermiques du démonstrateur SAED installé sur la plateforme solaire du CEA à Cadarache. Les boucles, mesurant environ 200 m et montées en parallèle, sont composées de tuyauteries entièrement soudées en acier noir.

Les centrales solaires thermodynamiques (CST) à concentration correspondent à l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil, concentrée sur une surface focale, en chaleur à température élevée. Cette chaleur est

ensuite convertie en énergie mécanique puis électrique (moteur ou turbine couplé à une génératrice de courant), au moyen d'un cycle thermodynamique. Les CST à concentration génèrent de l'électricité dans des gammes de puissance allant de quelques **kWe** à quelques centaines de **MWe**. En les couplant à un système de stockage thermique, il est possible d'étendre leur durée de fonctionnement jusqu'à une douzaine d'heures. En outre, l'énergie thermique non convertie en électricité peut être directement utilisée pour le chauffage ou être valorisée sous forme de source chaude pour des dispositifs de climatisation (systèmes à sorption)⁽¹⁾ ou de dessalement (distillation).

Il existe quatre types principaux de CST à concentration selon la nature de la surface réfléchissante et la manière dont la lumière solaire est concentrée : les centrales à tour à **héliostats** et les centrales à collecteurs paraboliques, à concentration ponctuelle, et les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et à miroirs

(1) Sorption : processus par lequel une substance est adsorbée ou absorbée sur ou dans une autre substance. Elle résulte de l'action de molécules de gaz ou de liquide qui, mises en contact avec un liquide ou un solide, adhèrent à sa surface (adsorption) ou s'incorporent dans la totalité de son volume (absorption).

de Fresnel, à concentration linéaire (figure 1). Les centrales solaires à concentration ponctuelle permettent d'atteindre des températures plus élevées, mais elles sont plus délicates à mettre en œuvre. À l'heure actuelle, la technologie du cylindro-parabolique est la plus mature. Elle représente la très grande majorité (95 % des capacités thermodynamiques installées) des centrales solaires en fonctionnement.

La puissance détermine le marché

Selon leur puissance, forte (supérieure à 50 MWe), moyenne (de 50 kWe à 50 MWe) ou petite (inférieure à 50 kWe), les CST à concentration se répartissent sur trois grands segments de marché (tableau).

Les centrales de forte puissance sont adaptées aux réseaux électriques interconnectés. Elles sont dédiées à une fourniture de base, avec ou sans hybridation (appoint sur turbine à vapeur à partir de combustible fossile). Pour les marchés de pointe ou de semi-pointe, elles associent d'importantes capacités de stockage. Pour ces centrales de forte puissance, les principaux enjeux résident en une augmentation des performances (élévation de la température de fonctionnement) et une diminution du coût de l'investissement pour le champ de capteurs solaires.

Les centrales de moyenne puissance s'adressent à des réseaux non interconnectés, avec une vocation de production plus proche de la demande. Sont visées la baisse des coûts de l'investissement et de fonctionnement ainsi que la flexibilité du fonctionnement. Les centrales de petite puissance concernent des sites isolés ou des micro-réseaux électriques. Il s'agit ici d'accéder à une très forte autonomie et une maintenance réduite. La durée de disponibilité de ces centrales peut atteindre 24 heures, avec de très grosses variations de la demande (0 à 100 % de la puissance maximale).

Au CEA, l'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux) développe, en partenariat avec des industriels, des technologies qui visent l'ensemble de ces marchés.

Des technologies innovantes

L'amélioration de la compétitivité des CST à concentration passe par un travail sur le coût et la valeur du kWh.

Le coût du kWh est proportionnel au montant de l'investissement initial divisé par la production électrique. Pour baisser ce coût, il faut donc soit réduire l'investissement, soit augmenter la quantité d'énergie générée. Le CEA a pris le parti de conduire des développements technologiques sur ces deux voies. Dans ce cadre, le Liten œuvre à la mise au point d'une technologie à bas coût basée sur des capteurs statiques (SAED). Ils s'intéressent également à une technologie utilisant des miroirs de Fresnel (ALSOLEN) fonctionnant à haute température (entre 300°C et 450°C). Cette technologie offre l'avantage d'atteindre des rendements élevés, pour un coût de fabrication inférieur au cylindro-parabolique traditionnel.

La valeur du kWh est donnée par la disponibilité et la qualité de l'énergie générée. D'où les travaux du Liten sur le stockage thermique de l'énergie, qui permet d'adapter la production électrique à la demande (voir *Les promesses du stockage thermique*, p. 44). Cette

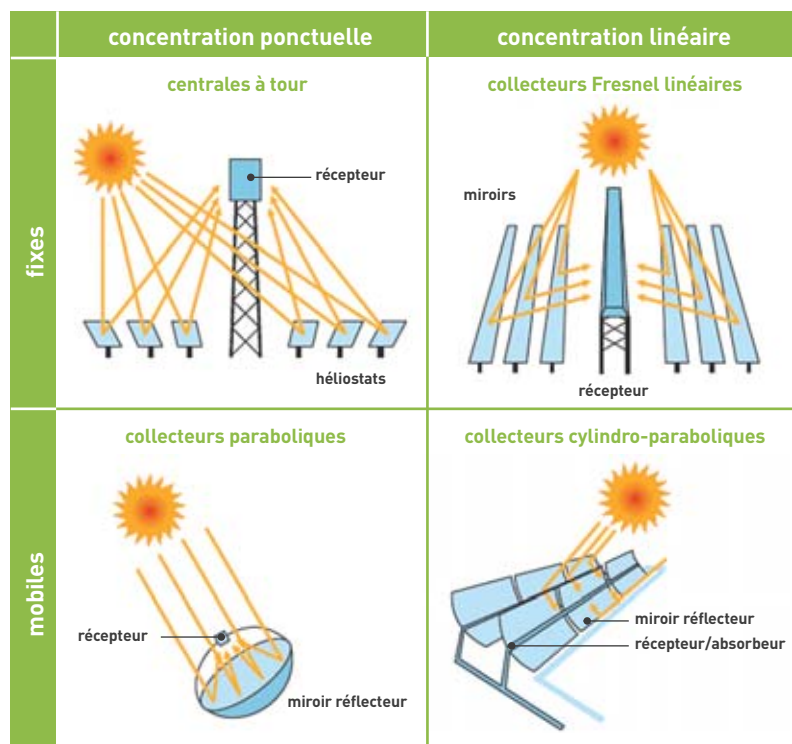


Figure 1. Les principales technologies de centrales solaires thermodynamiques à concentration.

capacité à moduler la puissance peut être réalisée à des coûts nettement plus faibles que si l'on avait recours à un stockage de l'énergie électrique, dans des batteries par exemple.

Technologie basse température à caloducs

En partenariat avec la société SAED (Sophia Antipolis énergie développement), le Liten a mis au point une technologie de champs de capteurs solaires. Extrapolée des capteurs solaires sous vide domestiques, elle s'appuie sur des caloducs originaux et brevetés intégrés dans des tubes sous vide. Ils autorisent un transfert efficace de la chaleur des tubes vers un circuit d'eau chaude. Cette technologie basse température est destinée à la production d'énergie thermique industrielle (de 80°C à 130°C) à faible coût. Elle comprend une fonction de stockage thermique simple (ballon d'eau chaude). De plus, les capteurs, qui utilisent le rayonnement direct et diffus du soleil, peuvent être implantés en zone côtière et tropicale. Courant 2011, un démonstrateur de 200 m² a été déployé sur la plateforme solaire du CEA à Cadarache. Il est désormais opérationnel. Cette solution technologique est entrée en phase commerciale en 2012.

Tableau. Segmentation du marché des centrales solaires thermodynamiques à concentration. Le marché se répartit en trois segments selon la puissance des centrales.

type	petite puissance	moyenne puissance	forte puissance
puissance électrique	< 50 kWe	50 kWe – 50 MWe	50 MWe – 500 MWe
réseau électrique	• micro-réseaux • sites isolés	• réseau local	• réseau interconnecté
enjeux	• forte autonomie • faible maintenance	• baisse des coûts d'investissement • faible maintenance	• forte performance • baisse des coûts d'investissement
coût objectif du kWh	0,30 €/kWh	0,15-0,25 €/kWh	0,08-0,15 €/kWh
marché actuel	quelques projets en cours	quelques projets en cours	2 GWe installés à ce jour



Les capteurs solaires thermiques du démonstrateur SAED sont intégrés dans des tubes sous vide. L'énergie solaire captée est ensuite transférée vers le caloporteur (eau) qui circule dans les tuyauteries en acier.



P. Aravian/CEA

Maquette de la centrale solaire thermodynamique à concentration à miroirs de Fresnel ALSOLEN, installée sur le site de l'Ines. Évolutive, elle a été conçue pour tester différentes options technologiques.



Ines/CEA

Technologie de Fresnel moyenne température

Le Liten s'intéresse, en partenariat avec la société Alsolen (Paris), à des CST à concentration à miroirs de Fresnel de moyenne puissance (jusqu'à 20 MWe) (figure 2). Les CST à concentration ALSOLEN fonctionnent avec une huile comme fluide caloporteur. Cette huile, portée à 300 °C, transfère son énergie thermique à un cycle organique de Rankine (ORC

pour *Organic Rankine Cycle*)⁽²⁾ qui, en actionnant une turbine, génère de l'électricité. Contrairement à la technologie SAED, la technologie ALSOLEN exploite le rayonnement direct du soleil et le concentre 50 fois sur un récepteur solaire. Son originalité réside notamment en une conception intégrant un maximum de fabrications sur le lieu d'installation, une maintenance réduite et aisée, ainsi qu'une longue durée de vie. Un stockage thermique associé autorise, le cas échéant, l'extension de trois à six heures du fonctionnement de la centrale solaire.

Une maquette de centrale productrice de chaleur ALSOLEN, comprenant 100 m² de miroirs et d'une puissance de 50 kW_{th}, a été réalisée début 2011 à l'Ines (**Institut national de l'énergie solaire**). Unique en son genre, elle permet de tester rapidement et simplement les performances thermiques de différents récepteurs solaires et les performances optiques de réflecteurs et de leur système de suivi du soleil. La maquette, évolutive, a été conçue pour pouvoir évaluer diverses options avec des éléments proposés par les industriels du solaire : éléments de récepteur, vitrage, fluide caloporteur... Le CEA et la société Alsolen disposent ainsi au plus vite des résultats des essais, ce qui leur offre la possibilité de sélectionner les options technologiques les plus performantes et les plus économiques pour les centrales de puissance supérieure à venir.

(2) Cycle organique de Rankine: le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique qui décrit le fonctionnement d'une machine à vapeur. Il comprend la vaporisation de l'eau, la détente de la vapeur dans une turbine ou sur un piston et la condensation de la vapeur à la sortie de la turbine dans un condenseur. Dans le cycle organique de Rankine, l'eau est remplacée par un fluide organique.

(3) La plateforme Prohytech vise à démontrer la faisabilité industrielle des procédés de production massive d'hydrogène.

(4) Durasol: ce projet comprend la mise en place d'une plateforme sur plusieurs sites, à ciel ouvert et en laboratoire, pour étudier la durée de vie des trois technologies solaires: le photovoltaïque, le solaire thermique et le solaire à concentration.

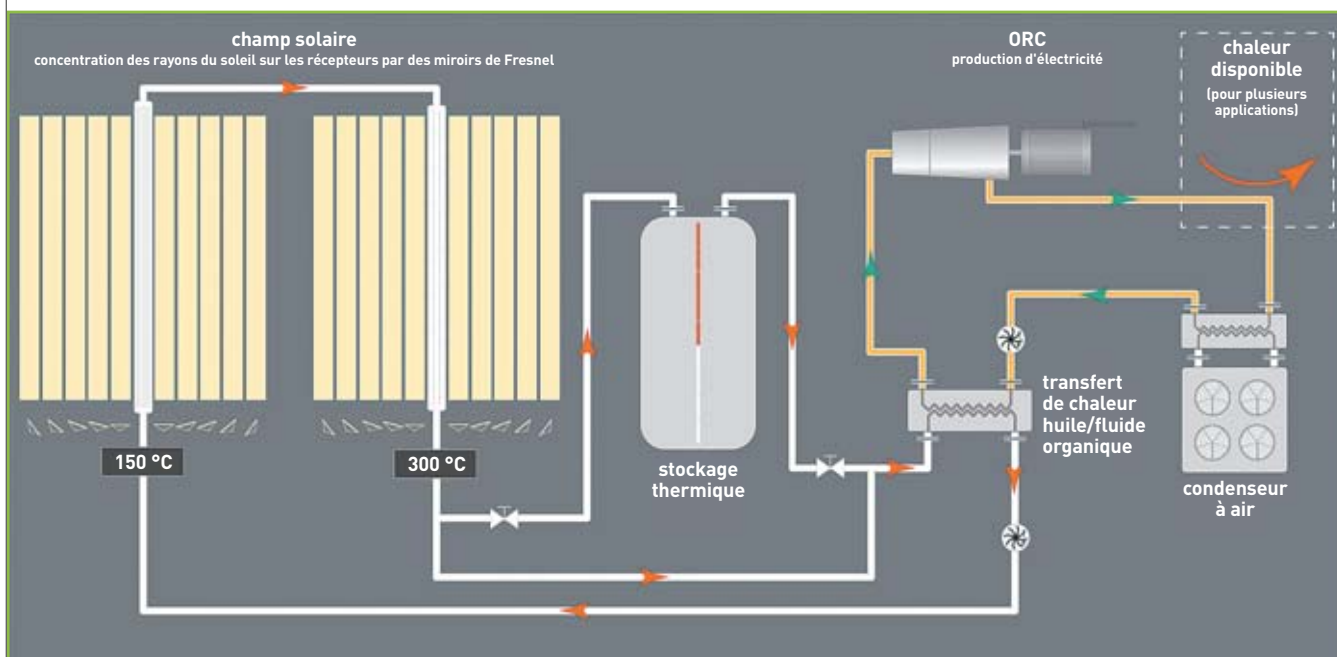


Figure 2.

Principe général d'une centrale solaire thermodynamique à concentration, exemple d'une centrale à miroirs de Fresnel et à caloporteur huile. Les rayons du soleil sont concentrés par un champ de miroirs de Fresnel. Le fluide caloporteur (huile) qui circule au niveau du récepteur est porté à une température de 300 °C. Il transfère son énergie thermique à un cycle organique de Rankine (ORC) qui fait fonctionner un générateur électrique. La chaleur peut également être stockée dans un réservoir intégré à la centrale.



Au cœur des miroirs de Fresnel du prototype ALSOLEN. Au lieu de courber les miroirs, processus coûteux, les miroirs de Fresnel sont très légèrement incurvés.

P. Avavian/CEA



P. Avavian/CEA

été mis au point, fabriqué et testé avec succès sur le grand four solaire d'Odeillo (Pyrénées-Orientales). À ce jour, bien que le concept soit validé et prometteur, la filière industrielle n'est pas encore mature. Pour ces projets, le Liten mobilise une trentaine de personnes qui travaillent sur le développement et l'optimisation des composants de la CST à concentration, notamment les éléments réfléchissants et leur système de suivi du soleil, le récepteur solaire, son traitement sélectif et sa boucle thermo-hydraulique.

Prototype de la centrale solaire thermodynamique à concentration à miroirs de Fresnel ALSOLEN, installé sur la plateforme solaire du CEA à Cadarache.

Un prototype complet de taille représentative a été construit sur la plateforme solaire du CEA à Cadarache à la fin de l'été 2011. Il dispose d'un champ solaire de 1 000 m² de miroirs, d'une turbine ORC de 50 kWe et d'un aéro-réfrigérant destiné à évacuer la puissance résiduelle sans utilisation d'eau. En complément, un stockage thermique à lit de roche de 30 m³, apportant une autonomie de quatre à six heures, a été mis en service fin octobre 2012 et des premiers tests ont été réalisés (voir *Les promesses du stockage thermique*, p. 44).

Le prototype servira également de source chaude à la plateforme Prohytech⁽³⁾, permettant ainsi de faire la démonstration de la valorisation de l'énergie thermique solaire pour le dessalement, la production de froid et la fabrication d'hydrogène par **électrolyse**.

Demain, la haute et très haute température

La course à la baisse du coût du kWh produit impose sans cesse de l'innovation. Dans le cas des CST à concentration, le paramètre température de la source chaude agit au plus haut point.

Dans ce cadre, le Liten développe une CST à concentration à miroirs de Fresnel de forte puissance (50 MWe et au-delà) dénommée ALSOLEN SUP. Cette technologie, dérivée d'ALSOLEN, générera directement de la vapeur surchauffée à 450 °C et sera dotée d'une capacité de stockage thermique. Les verrous technologiques à lever concernent la production de vapeur à hautes pression et température, qui implique des facteurs de concentration importants (> 50), des traitements sélectifs performants et à haute température, ainsi qu'un stockage thermique. Un prototype de 1 500 m² sera réalisé et mis en service au printemps 2013 sur le site de Cadarache.

Le Liten, en partenariat avec le laboratoire Promes (Procédés, matériaux et énergie solaire) du **CNRS**, s'intéresse également aux centrales solaires à tour. Un récepteur solaire original à air chaud (700-800 °C) a

Des recherches de pointe

Au travers de modélisations fluidiques, thermiques, mécaniques et optiques, le Liten dispose d'outils permettant la conception complète de l'architecture de CST à concentration et l'évaluation du productible solaire. Il mène également des études de durabilité afin d'assurer un bon fonctionnement de ces CST en environnement difficile (sable, vent, rayonnement ultraviolet). Une triple stratégie est mise en place. Des études systématiques de modes de défaillance sont conduites sur l'ensemble des sous-systèmes de la centrale solaire. Ces études sont ensuite enrichies par des tests de vieillissement accéléré en laboratoire (humidité, température, rayonnement ultraviolet, sable...). À ce titre, le projet Durasol⁽⁴⁾ du Liten, lauréat début 2012 du 2^e appel à projets Equipex (Équipement d'excellence, **Programme d'investissements d'avenir**) va donner des moyens de premier ordre pour poursuivre cette démarche. Enfin, une collaboration avec la **fondation MAScIR (Moroccan foundation for Advanced Science, Innovation and Research)** de Rabat (Maroc) a été engagée fin 2011 pour mettre en place et suivre le comportement d'éléments de champ solaire dans un environnement réel (désertique par exemple).

Ces nouvelles compétences, renforcées par les équipes de R&D sur la valorisation thermique (stockage thermique, dessalement, chaleur, froid, hydrogène), font du Liten un acteur majeur sur les CST à concentration, au niveau français et demain au niveau international.

> Patrice Tochon¹ et Bernard Thonon²

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)

Direction de la recherche technologique

¹CEA Centre de Grenoble

²CEA Grenoble (Site Ines)



Les promesses du stockage thermique

Le stockage de chaleur est un élément indispensable d'une centrale solaire thermodynamique à concentration car il permet de gérer l'efficacité de la production électrique tout au long de la journée et de l'adapter à la demande. Il est également très prometteur pour le stockage massif d'électricité ou la valorisation énergétique des rejets industriels.



Torresol Energy Investments, S.A.

La centrale solaire thermodynamique à concentration Gemasolar. Située près de Séville (Espagne), Gemasolar est une centrale à tour utilisant un mélange de sels fondus (nitrate de potassium et nitrate de sodium) pour stocker la chaleur. Répartis sur 185 hectares, 2650 miroirs (des **héliostats**) suivent la course du soleil. Ils réfléchissent et concentrent les rayons du soleil en les faisant converger vers un récepteur situé au sommet de la tour au niveau duquel circulent les sels fondus qui emmagasinent la chaleur. Le système de stockage correspond aux deux gros réservoirs (l'un de sels froids, l'autre de sels chauds) visibles au pied de la tour.

Mettre une pierre à côté du feu puis la déplacer, chaude, vers l'endroit que l'on désire chauffer : le stockage thermique est aussi vieux que la découverte du feu par l'homme. Il n'en est pas moins une technologie d'avenir pour les énergies renouvelables. Il est d'autant plus intéressant que des technologies déjà largement éprouvées sont aujourd'hui disponibles industriellement et que de nouvelles possibilités d'amélioration de la compacité, de l'efficacité ou de la durée des installations sont ouvertes.

Les phénomènes physiques

Le stockage puis la restitution de la chaleur sont basés sur trois phénomènes physiques. Le premier, la chaleur sensible, consiste à utiliser la chaleur pour augmenter la température d'un solide ou d'un liquide, qui vont à leur tour transférer leur chaleur à un fluide. Tel est le rôle joué par le ballon d'eau chaude couplé à des panneaux solaires thermiques : il stocke de la chaleur qu'il restitue ensuite au travers de l'eau chaude sanitaire ou d'un plancher chauffant. Le deuxième phénomène physique résulte de l'emploi de matériaux de stockage qui ont la propriété de changer de phase, de l'état solide à l'état liquide, sous l'effet de la chaleur, puis de l'état liquide à l'état solide en se refroidissant, d'où leur nom de matériaux à changement de phase (MCP). L'énergie par unité de volume délivrée par un tel système peut être élevée pour certains matériaux particulièrement adaptés comme les paraffines ou les sels. Le dernier phénomène est basé sur l'exploitation de réactions chimiques réversibles qui, dans un sens, ont besoin de chaleur pour se réaliser (endothermiques) et qui, dans l'autre sens, libèrent de la chaleur (exothermiques). L'intérêt de cette technique de stockage de l'énergie est

lié non seulement aux densités volumiques d'énergie, qui peuvent atteindre de très hauts niveaux, mais aussi à la durée de stockage lui-même, qui peut être très longue et permet d'envisager un stockage saisonnier.

Le stockage de chaleur est déjà intégré dans plusieurs centrales solaires thermodynamiques (CST) à concentration, telle la centrale à miroirs cylindro-paraboliques Andasol en Espagne ou la centrale à tour Solar Two en Californie (États-Unis). Le système de stockage par chaleur sensible utilise un sel fondu circulant entre deux réservoirs, l'un où il est stocké « froid », vers 200°C, et l'autre « chaud », vers 450°C. Équipée d'un système de stockage du même type, la centrale à tour Gemasolar, inaugurée en octobre 2011 en Espagne, est capable de produire de l'électricité 24 heures sur 24.

De nouveaux développements

Avec l'essor prévisible des CST à concentration, de nouveaux systèmes de stockage de chaleur vont devoir être mis au point, mieux adaptés aux niveaux de températures des différentes technologies, plus efficaces, plus compacts et ne nécessitant que de petites quantités de matériaux qui imposent des contraintes de sécurité particulières, comme les sels fondus.

Parmi ces systèmes, le stockage de chaleur à partir des rejets thermiques industriels à basse température est appelé à se développer. En effet, lorsqu'il est couplé à des systèmes de rehausse des températures, il permet de valoriser une énergie, qui autrement serait perdue, en décalant son utilisation dans le temps.

Le stockage massif d'électricité (de l'ordre du **GWh**) sous forme thermique à haute température est une autre voie d'avenir. Deux procédés sont actuellement étudiés, le stockage d'énergie par air comprimé (CAES pour *Compressed Air Energy Storage*) et le stockage d'énergie par pompage thermique (SEPT).

Le stockage d'énergie par air comprimé consiste à se servir de l'électricité excédentaire pour comprimer de l'air qui est ensuite stocké à haute pression (de l'ordre de 100 **bars**) dans une cavité souterraine. Par la suite, cet air est détendu dans une turbine pour produire de l'électricité dans les périodes de forte demande. Il est indispensable de stocker la chaleur de compression à haute température, si l'on désire atteindre des rendements satisfaisants. Le stockage d'énergie par pompage thermique a été développé dans le cadre du projet SETHER⁽¹⁾, financé par l'ANR (**Agence nationale de la recherche**). Ce projet est mené par l'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux) du CEA en partenariat avec la société Saipem, à l'origine du procédé. Dans ce cas, l'électricité, transformée en chaleur, est stockée dans deux enceintes au travers d'un cycle thermodynamique de pompe à chaleur très haute température (800°C). La chaleur est alors

(1) Projet SETHER : Stockage d'Électricité sous forme THERmique à haute température.

utilisable pour la production d'électricité *via* un cycle de moteur thermique classique. L'efficacité du stockage thermique est un élément-clé du dimensionnement et du coût d'une telle installation.

Les axes de recherche

Le Liten est très impliqué dans l'étude des différentes solutions technologiques de stockage. Les travaux portent sur plusieurs aspects. Concernant les matériaux, l'accent est mis sur la détermination de leurs propriétés physiques thermiques, leur compatibilité avec les fluides caloporteurs et la réalisation de tests sur leur tenue dans le temps. Les aspects relatifs au transfert de chaleur sont particulièrement étudiés. En effet, l'énergie solaire est toujours absorbée par un fluide qui doit la céder à un solide pour qu'elle soit stockée. Les capacités de stockage ou le temps de réponse du système sont conditionnés par la qualité des échanges thermiques. Le Liten travaille donc à leur intensification, par l'optimisation des formes géométriques des systèmes à chaleur sensible ou par l'utilisation concrète des MCP, qu'il convient de « doper » par des structures de type échangeur de chaleur afin d'améliorer leur taux naturel de transfert de chaleur.

Des installations expérimentales adaptées

Le Liten dispose d'installations expérimentales, uniques en leur genre, dédiées à l'étude de solutions de systèmes de stockage de chaleur, depuis l'installation simple d'étude phénoménologique jusqu'à la boucle de tests à échelle semi-industrielle.

Parmi les installations d'étude phénoménologique, celle consacrée à la mise en œuvre des MCP a une section d'essais constituée d'un tube de 4 cm de diamètre et de 40 cm de long, transparent et avec 40 mesures de température pour permettre le suivi précis du front de fusion et la validation des simulations.

La boucle de tests CLAIRE, qui s'adresse aux hautes températures (supérieures à 500°C), permet les études sur le stockage thermique par chaleur sensible. Utilisant l'air comme fluide caloporteur, elle est à une échelle semi-industrielle, avec des volumes de stockage (10 m³) et des puissances thermiques (1 MW) significatifs.

L'installation STONE est dédiée à l'étude du stockage thermique des CST à concentration à miroirs de Fresnel et avec de l'huile comme fluide caloporteur (voir *Concentrer l'énergie du soleil*, p. 40). Elle autorise le suivi détaillé du fonctionnement d'un lit de roche grâce à une instrumentation fine (220 mesures de température



CeA

Vue globale de la boucle STONE (à gauche), avec remplissage de type lit de roche (à droite). Dans une centrale solaire thermodynamique à concentration, le fluide caloporteur chaud peut être envoyé vers le réservoir de stockage où il cède sa chaleur au lit de roche, en le chauffant progressivement depuis le haut vers le bas, et ressort froid. Quand le soleil n'est plus suffisant pour apporter l'énergie nécessaire à la centrale, le fluide caloporteur, injecté froid en bas du réservoir de stockage, se réchauffe au contact du lit de roche et ressort chaud par le haut. Il sert ensuite à produire de l'électricité. Au fur et à mesure de son utilisation, le lit de roche se refroidit progressivement du bas vers le haut. L'intérêt du lit de roche est son coût très raisonnable et la disponibilité du matériau naturel de stockage.

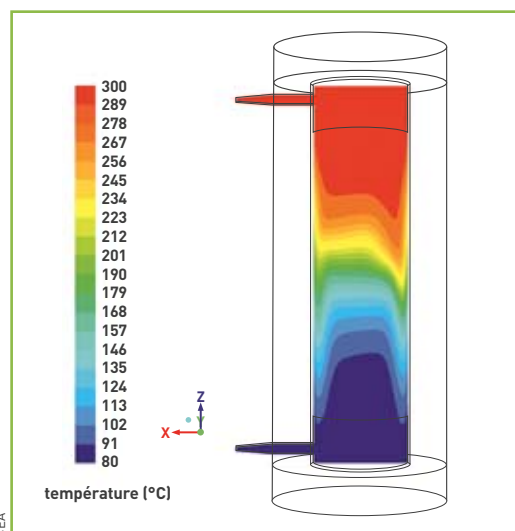
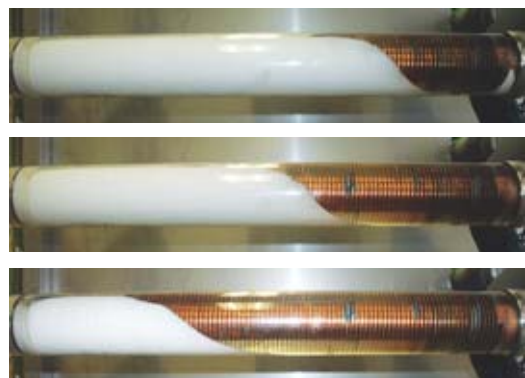


Figure.
Simulation de la progression du front de chaleur dans un lit de roche. Le fluide caloporteur (huile) cède progressivement sa chaleur au lit de roche du haut vers le bas. Il ressort froid.



CeA

Fusion progressive d'un matériau à changement de phase (MCP) autour d'un tube à ailettes transverses.

pour 3 m³ de stockage). En complément, la simulation numérique du stockage thermique permet de visualiser la progression du front de chaleur dans ce lit (figure). Les simulations sont validées par comparaison avec les mesures de température de l'installation STONE. Pour fixer les ordres de grandeur, il est intéressant de préciser que le volume de stockage d'une installation industrielle devrait varier de quelques dizaines à quelques centaines de m³.

Alors que la conservation de l'énergie pour une utilisation ultérieure va rapidement devenir indispensable pour une gestion efficace des ressources énergétiques, classiques et renouvelables, le stockage thermique est une solution particulièrement adaptée pour répondre à ce besoin. Le Liten a l'expérience et les outils nécessaires pour accompagner son développement, par la mise en œuvre de solutions éprouvées ou très innovantes.

> Jean-François Fourmigué

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble



Biocarburants de 2^e génération : le projet Syndièse

La production de biocarburants à partir de biomasse non alimentaire se situe dans la droite ligne des objectifs français et européens de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Fort de ses travaux dans ce domaine, **le CEA a pris l'initiative de développer un pilote préindustriel de fabrication de biodiesel, de biokérosène et de naphta à partir de la gazéification de résidus forestiers par un procédé thermochimique.** Ce projet, qui à terme devrait fournir annuellement plus de 30 millions de litres de biocarburants, préfigure ce que pourrait être une filière industrielle française dans ce domaine.



Airbus SAS 2011

L'Airbus A380-800 ACJ (Airbus Corporate Jetliner). La compagnie Airbus est partie prenante de l'initiative *Biofuel Flightpath* lancée par la Commission européenne pour accélérer la production et la commercialisation de biocarburants pour le transport aérien.

La France tire aujourd'hui près de 50 % de ses besoins en énergie des ressources **fossiles**, contre plus de 80 % dans les autres pays du monde. Cette situation particulière tient à la part majoritaire (78 %) du parc électronucléaire français dans la production d'électricité. La dépendance aux combustibles fossiles n'en demeure pas moins importante dans certains secteurs tels que les transports routiers, aériens et maritimes.

Les incertitudes croissantes sur le prix des **hydrocarbures**, dans un contexte géopolitique sensible, et l'essor des politiques nationales et internationales de lutte contre le réchauffement climatique ont poussé le Gouvernement à donner en 2009, à la suite du **Grenelle de l'environnement**, une forte impulsion au développement des énergies renouvelables. Dans le secteur des transports, l'État s'est ainsi engagé à réduire de 20 % les émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2020. L'Union européenne s'est également fixé des objectifs ambitieux dans ce domaine. Son but d'ici 2020 est que 10 % des énergies soient d'origine renouvelable.

Aussi, la **Commission européenne** a lancé, à l'occasion du dernier Salon du Bourget, l'initiative *Biofuel Flightpath*, en coordination avec Airbus, les compagnies aériennes et des producteurs de biocarburants. Cette initiative vise à accélérer la production et la commercialisation des biocarburants pour les avions en Europe. L'objectif est d'arriver, toujours d'ici 2020, à une consommation annuelle de deux millions de tonnes de biocarburant (*biofuel*) par l'aviation civile, ce qui représente environ 4 % de la consommation actuelle de carburants en Europe.

Des solutions bas carbone pour tous les types de transports

Du fait de l'urbanisation croissante et de la concentration des populations autour des villes, environ 80 % de la consommation annuelle de carburants fossiles dans le domaine des transports concernent des trajets inférieurs à 100 km par jour. Les véhicules disposant de motorisations entièrement ou partiellement électriques offrent d'ores et déjà des possibilités opérationnelles efficaces. Néanmoins, pour les trajets de longue et moyenne distances et, plus particulièrement, pour les transports par camion ou par voie maritime, qui nécessitent la mise en jeu de fortes puissances, les biocarburants de type diesel-FT, issus d'un procédé Fischer-Tropsch⁽¹⁾, apparaissent comme une réelle solution alternative.

De son côté, le transport aérien est soumis, depuis le 1^{er} janvier 2012, au marché européen des ETS (*European Union Emissions Trading System*), une taxe proportionnelle aux émissions de gaz à effet de serre. L'augmentation de cette contrainte économique, dans un secteur très concurrentiel et en fort développement, implique une recherche de solutions alternatives au **kérosène** utilisé actuellement. Les biocarburants liquides de type jet fuel-FT⁽²⁾ (**biokérosène**) se révèlent une voie de substitution prometteuse.

(1) Procédé Fischer-Tropsch (FT) : procédé catalytique de production d'hydrocarbures à partir de gaz de synthèse (monoxyde de carbone CO, hydrogène H₂).

(2) Jet fuel-FT : le jet fuel est un carburant à base de kérosène utilisé par les moteurs d'avion à turbine. Le jet fuel-FT est obtenu par un procédé Fischer-Tropsch.

Les biocarburants : enjeux et recherche au CEA

Le triple besoin du secteur des transports (routiers, maritimes, aériens) place les biocarburants au cœur des recherches actuelles. Le CEA s'implique depuis plusieurs années dans des programmes de R&D sur les 2^e et 3^e générations de biocarburants (voir *Des microalgues pour la production de biocarburants*, p. 49). Ceux de 2^e génération sont produits à partir des fractions non comestibles des végétaux (bois, tiges et partie non alimentaire des plantes, déchets végétaux). Afin de ne pas concurrencer les filières alimentaires et industrielles existantes, en particulier celle du bois, l'organisation des filières d'approvisionnement de la **biomasse** est un enjeu important. Cette organisation devra notamment s'inscrire dans l'utilisation de rémanents forestiers (restes de branches et de troncs laissés en forêt par les exploitants) et de déchets agricoles, prendre en considération les principes de gestion durable de la forêt ainsi que le respect de l'environnement et de la biodiversité. Elle sera tenue d'intégrer des dispositifs visant à minimiser les surfaces agricoles et forestières mobilisées, grâce à l'augmentation des rendements massiques de conversion de la chaîne de procédés qui transforme la biomasse en carburant⁽³⁾. Pour les biocarburants de 2^e génération, deux pistes sont explorées : la voie biologique, pour la fabrication du **bioéthanol**, et la voie thermochimique, pour le **biodiesel** et le jet fuel-FT.

Le CEA privilégie la voie thermochimique, appelée *Biomass to Liquid* (BtL, de la biomasse au biocarburant). C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet de démonstrateur préindustriel Syndièse.

Le projet Syndièse : quatre étapes et une première mondiale

L'objectif du projet Syndièse est d'exploiter, sur un site unique, un démonstrateur préindustriel de production de biocarburants de 2^e génération (BtL) à Bure-Saudron (Meuse - Haute-Marne). À partir de 125 000 tonnes de ressources ligno-cellulosiques⁽⁴⁾ à 35 % d'humidité, cette installation pourra fournir plus de 30 millions de litres par an de biocarburants, utilisables directement dans les domaines des transports terrestres et aériens, ainsi qu'en pétrochimie. Syndièse devrait créer une centaine d'emplois directs pour l'exploitation de l'installation et le développement de la filière d'approvisionnement. Il consiste à intégrer sur un même site une chaîne de procédés

(3) Rendement massique : masse équivalente de carburant synthétisé rapportée à la masse de biomasse sèche utilisée.

(4) Ligno-cellulose : composé présent dans les membranes des cellules végétales, très abondant dans le bois et la paille.



P. Avavian/CEA

matures pour en démontrer la faisabilité industrielle. La voie technologique de ce projet se divise en quatre étapes principales (figure).

Une première étape réside en un prétraitement des résidus forestiers (ligno-cellulose) pour les concentrer, c'est-à-dire pour en réduire l'humidité et la taille des constituants. Avec un apport d'oxygène et de vapeur, à haute température (de l'ordre de 1300 à 1400 °C) et haute pression, la biomasse prétraitée se décompose en un gaz de synthèse (hydrogène H₂, monoxyde de carbone CO), appelé syngas. C'est donc un procédé thermochimique. La technologie employée, par réacteur à flux entraîné, permet d'obtenir un gaz riche en monoxyde de carbone et hydrogène, avec le moins d'impuretés possible.

Dans l'étape suivante, de post-traitement, le syngas est débarrassé des impuretés et enrichi en hydrogène afin de doubler le rendement de production (l'hydrogène est généré par **électrolyse** de l'eau au sein même de l'installation). Cet apport d'hydrogène dans la chaîne de procédés constituera une première mondiale.

Le syngas est alors transformé en longues chaînes carbonées —(CH₂)— grâce à une réaction **catalytique** de type Fischer-Tropsch.

La dernière étape consiste à couper ces chaînes aux longueurs correspondant au diesel, au jet fuel et au **naphtha** de synthèse par **hydrocraquage**.

Échantillons de biomasse ligno-cellulosique. Cette matière première renouvelable n'entre pas en compétition avec les filières alimentaires et industrielles existantes.

Un partenariat CEA - Industriels

La société allemande Choren était initialement le bailleur de procédés de la brique technologique de gazéification. Suite à sa mise en redressement judiciaire à l'été 2011, suivie de sa liquidation en février 2012,

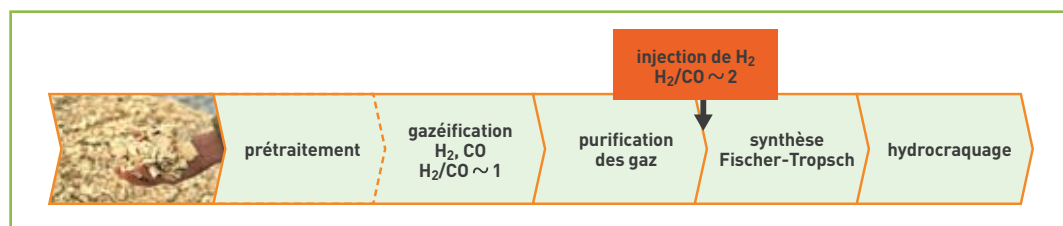
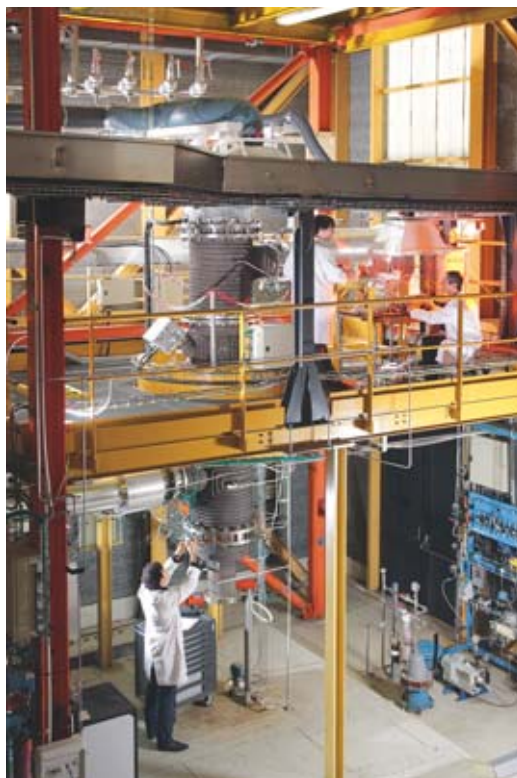


Figure.

Les étapes du projet Syndièse. La technologie mise en œuvre dans le cadre de Syndièse comporte 4 étapes : prétraitement des déchets forestiers et gazéification ; purification du gaz de synthèse obtenu (hydrogène H₂, monoxyde de carbone CO) et enrichissement en hydrogène ; transformation catalytique du syngas en longues chaînes carbonées par un procédé Fischer-Tropsch ; production de biocarburants par hydrocraquage des longues chaînes.



Installation PEGASE située sur le Centre CEA de Grenoble. PEGASE (*Pure and Energetic synthetic GAS Elaboration*) permet de réaliser la purification à haute température du gaz de synthèse issu de la gazéification de la biomasse lignocellulosique.



P. Anavian/CEA

le CEA a décidé, sur la base des résultats probants des programmes de recherche qu'il mène depuis plusieurs années sur ses installations situées à Grenoble, de développer, avec un partenaire industriel français majeur, un concept innovant de gazéification de la biomasse. La première étape du projet Syndièse va donc consister à réaliser, à Bure-Saudron, une unité pilote de démonstration de ce concept. Cette unité pourra traiter une tonne de biomasse par heure. À l'issue de cette phase de validation, la chaîne complète de procédés visant à produire des biocarburants, dont les bailleurs sont Air Liquide-Lurgi, GTL.F1 et UOP pour, respectivement, les étapes 2, 3 et 4, sera réalisée. Le feu vert pour la phase 1 du projet Syndièse a été donné le 4 février 2013.

(5) Biotope: milieu de vie où les conditions physiques et chimiques (eau, lumière, température...) sont considérées comme homogènes et stables. Il est peuplé d'une faune et d'une flore caractéristiques.

(6) Analyse de cycle de vie: méthode d'évaluation des impacts environnementaux des produits et services, depuis l'extraction ou la récolte des matières premières jusqu'à leur élimination ou leur recyclage après usage.



Chim-Architav

Projet du démonstrateur préindustriel de production de biocarburants de 2^e génération (BtL) à Bure-Saudron (Meuse – Haute-Marne). Entrée de l'usine Syndièse.

Respecter une gestion durable de la ressource et minimiser les impacts environnementaux

Tout est mis en œuvre pour que la construction et l'exploitation du démonstrateur aient un impact minimal sur les plans environnemental et énergétique.

Le procédé a ainsi été optimisé et les produits intermédiaires valorisés. Par exemple, la chaleur excédentaire est utilisée pour le séchage de la biomasse et pour la production d'une partie de l'électricité nécessaire au procédé. L'eau issue du séchage est employée pour générer l'hydrogène indispensable au procédé par électrolyse, etc.

Une évaluation des incidences du projet Syndièse sur la biodiversité a été menée. Le but était de regarder l'impact de la construction du site et de son exploitation sur les espèces animales et végétales rares ou protégées, sur la perte de biotope⁽⁵⁾, sur l'eau, sur les zones protégées à proximité (sites du réseau Natura 2000), etc. Les études ont été conduites en lien avec des spécialistes de ces activités: bureaux d'études experts en environnement tels que Sciences Environnement et Bertin Technologies, ou encore Inrap (Institut national de recherches archéologiques préventives). Les résultats de ces études montrent que les impacts sur la biodiversité sont faibles voire nuls. En termes de gestion forestière durable, le CEA demandera contractuellement aux fournisseurs de biomasse que celle-ci soit majoritairement certifiée PEFC (Programme européen des forêts certifiées) ou FSC (*Forest Stewardship Council*), labels garantissant une gestion durable de la forêt. Le CEA a validé au préalable la faisabilité de cette exigence en local: plus de 80 % des surfaces considérées sont aménagées et en partie exploitées dans le respect de ces labels.

En complément, une étude Analyse de cycle de vie⁽⁶⁾ (étude ACV) a été réalisée par BIO Intelligence Service, cabinet indépendant de conseil en environnement. Cette entreprise participe au projet européen BioGrace, qui vise à harmoniser les calculs des émissions de gaz à effet de serre inclus dans la directive européenne sur les énergies renouvelables de 2009. L'étude d'avant-projet sommaire, finalisée en 2011, a apporté les données techniques (bilan en masse et énergie, rendement) permettant de quantifier le bilan en termes de gaz à effet de serre de l'ensemble des composants technologiques de Syndièse: le séchage des plaquettes forestières, la gazéification, la purification du syngas, la synthèse Fischer-Tropsch, la production d'hydrogène par électrolyse alcaline, les postes permanents liés aux utilités. Les phases de démarrage et de maintenance ont aussi été intégrées.

Les conclusions de cette étude démontrent que le projet Syndièse, tel qu'il est envisagé, conduira à une réduction de l'émission de gaz à effet de serre de 77 % par rapport au **diesel** issu des ressources fossiles. Ce résultat est significativement supérieur à l'objectif de réduction établi à 60 % par la Commission européenne et confirme que le projet Syndièse contribue bien à la mise en œuvre des objectifs de diminution des émissions de gaz à effet de serre que l'Union européenne s'est fixée.

➤ **Thierry Pussieux**

Direction de l'innovation
et du soutien nucléaire (DISN)
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay

Des microalgues pour la production de biocarburants

Comparées aux plantes céréalières et sucrières de grande culture utilisées pour l'élaboration des biocarburants de 1^{ère} génération, les microalgues présentent de nombreux avantages. Elles possèdent notamment une productivité surfacique élevée et peuvent être produites sur des terres non cultivables par l'agriculture classique, limitant ainsi la compétition avec la filière alimentaire. Elles ont la capacité de fabriquer naturellement des molécules à forte teneur énergétique. **Cultivés en masse, ces microorganismes pourraient à l'avenir produire des biocarburants dits de 3^e génération.** Pour relever ce défi, le CEA mène des travaux visant à faire sauter les verrous, tant sur le plan biologique que sur celui des procédés, auxquels se heurte encore l'exploitation des microalgues pour la production d'énergie.



Culture de microalgues en photobioréacteurs instrumentés pour l'analyse des capacités de production des souches.

Les microalgues présentent une très grande diversité d'organismes biologiques, allant des **cyanobactéries** aux **protistes photosynthétiques**, en passant par les **algues vraies** (dont les algues vertes ou chlorophycées). Cette biodiversité résulte d'une histoire évolutive très complexe au cours de laquelle elles ont évolué par paliers, suite à des emboîtements de cellules les unes dans les autres ou endosymbioses. Ces organismes ont colonisé la plupart des environnements terrestres (océans, lacs, rivières, sols, glaces et déserts). Grâce à la **photosynthèse**, ils utilisent l'énergie solaire, l'eau et le gaz carbonique (CO₂) pour élaborer de la **biomasse** et sont responsables de 40 à 50 % de la fixation de CO₂ sur Terre. Certaines espèces accumulent ainsi jusqu'à 60 % de leur poids sec en

huiles (lipides de réserve constitués de triglycérides, composés complexes contenant de longues chaînes carbonées), ce qui représente une ressource intéressante pour la synthèse de **biodiesel**. Toutefois, la production mondiale de biomasse de microalgues, destinée pour l'essentiel aux marchés des composés à haute valeur ajoutée (compléments alimentaires, cosmétique...), reste confidentielle. Elle est ainsi estimée à 15 000 tonnes en 2011.

Dans les années quatre-vingt-dix, un ambitieux programme de recherche, l'*Aquatic Species Program*, ayant pour but d'explorer la potentialité des microalgues pour la fabrication de biodiesel, a été financé aux États-Unis. En France, des recherches sur les microalgues ont été initiées au CEA dans les années



CEA



G. Lesénéchal/CEA



A. de Martino, C. Bowler/ENS Paris

Microalgues modèles développées pour faire progresser les recherches en biologie. À gauche, la cyanobactérie *Synechocystis* vue en microscopie électronique à balayage. Elle présente l'intérêt de pouvoir être facilement modifiée par ingénierie métabolique pour la production de biocarburants. Au milieu, *Chlamydomonas reinhardtii* qui est une microalgue verte d'eau douce flagellée. À droite, la diatomée marine *Phaeodactylum tricornutum*. Polymorphe, elle présente trois morphotypes. Les diatomées sont des organismes unicellulaires photosynthétiques caractérisés par une enveloppe externe en silice.



quatre-vingt, en particulier dans le cadre de l'Association pour la recherche en bioénergie solaire (ARBS). Depuis les années 2000, on assiste à un regain d'intérêt pour l'utilisation des microalgues en vue de la production d'énergie, sous forme d'hydrogène et de biodiesel. D'importants investissements privés et publics ont notamment été réalisés aux États-Unis et de nombreuses sociétés ont vu le jour, telles que Sapphire, Solazyme, Synthetic Genomics et Aurora Fuels.

En France, plusieurs équipes du CEA⁽¹⁾ allient leurs efforts pour relever le défi des biocarburants de 3^e génération. Ces recherches sont soutenues par différents projets financés par l'Agence nationale de la recherche ANR (projets Shamash, Algomics, Diesalg, DiaDomOil) ou par le Fonds unique interministériel FUI (projet Salinalgue). Ils entrent pour part dans le cadre de l'IEED Green Stars.

Les mécanismes biologiques de l'accumulation de lipides de réserve

Lorsqu'elles rencontrent des conditions de culture défavorables à leur croissance (limitation en azote, stress...) les microalgues, à l'instar d'autres organismes, accumulent des composés de réserve comme de l'amidon ou des lipides (huile). La biosynthèse des triglycérides de l'huile s'effectue en trois étapes principales et fait intervenir plusieurs compartiments de la cellule (figure). Les triglycérides sont ensuite stockés dans des corps lipidiques présents dans le cytoplasme et le chloroplaste.

Les propriétés des huiles des microalgues sont déterminées par les caractéristiques des acides gras constituant les triglycérides, notamment la longueur des chaînes carbonées et leur degré d'insaturation, défini par le nombre de doubles liaisons carbone-carbone.



G. Lesénéchal/CEA

Banques de mutants de microalgues cultivées en milieu liquide.

La présence d'acides gras saturés accroît la viscosité des huiles. Pour éviter que le biodiesel ne se fige à température ambiante, il faut augmenter le nombre de doubles liaisons carbone-carbone, ce qui a aussi pour effet d'accroître l'instabilité à l'oxygène, ou diminuer la longueur des chaînes carbonées. Des travaux de génie génétique sont mis en œuvre pour optimiser la composition des huiles afin de répondre aux critères de viscosité et de stabilité.

Améliorer la productivité des souches

Quelques rares espèces sauvages de microalgues sont à ce jour cultivées industriellement. Leur domestication reste donc un enjeu majeur pour qui veut les utiliser pour la production de molécules d'intérêt. Il s'agit notamment d'obtenir des souches accumulant des huiles sans avoir recours à une carence nutritive, car celle-ci diminue fortement la productivité. Plusieurs stratégies sont déployées. Elles font appel à des techniques à haut débit et à des plateformes technologiques de pointe (séquençage de génomes, analyses globales des protéines ou des lipides), qui sont des atouts forts de la Direction des sciences du vivant (DSV) du CEA. Il s'agit d'une part de rechercher dans la biodiversité naturelle des souches présentant des propriétés d'intérêt et, d'autre part, de générer de la diversité par mutation pour créer chez une espèce modèle des propriétés nouvelles et identifier les gènes impliqués. La collecte d'espèces issues de la biodiversité est notamment réalisée lors de campagnes de prélèvements au cours de missions océanographiques de grande ampleur telles que Tara Oceans, et sa prolongation par le programme Biotechnologies et Bioressources Oceanomics, auxquels la DSV est associée au travers de plusieurs de ses instituts.

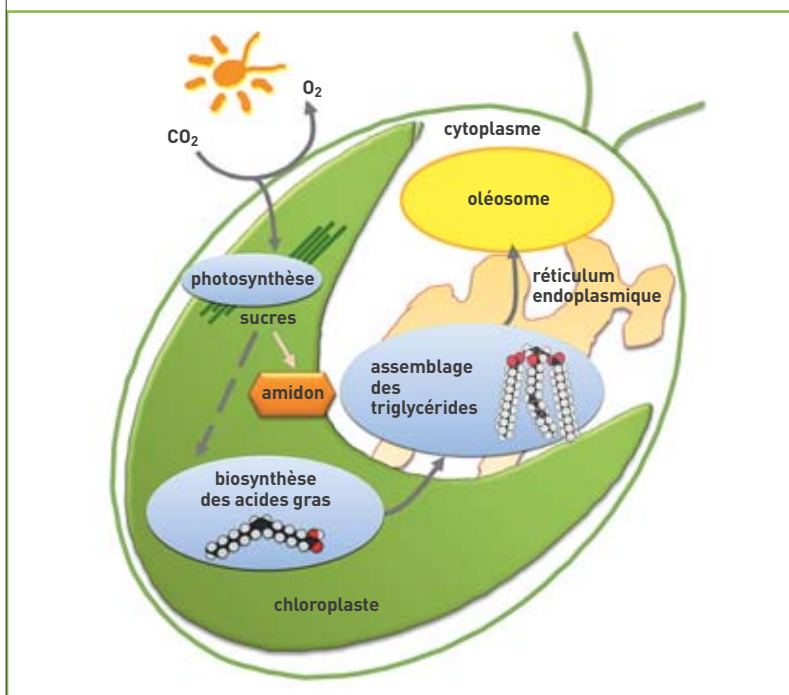


Figure.

La biosynthèse des triglycérides chez les microalgues. Elle a lieu dans les chloroplastes, organites cellulaires sièges de la photosynthèse. Les acides gras sont d'abord fabriqués dans les chloroplastes, à partir des sucres issus de la photosynthèse. Après modification, trois acides gras sont combinés à une molécule de glycérol pour former un triglycéride au niveau du réticulum endoplasmique ou du chloroplaste. Les triglycérides sont stockés dans des oléosomes, structures lipidiques présentes dans le cytoplasme et les chloroplastes.

(1) Il s'agit des équipes de la Direction des sciences du vivant [l'Institut de biologie environnementale et biotechnologie (iBEB, centre de Cadarache), l'Institut de recherches en technologies et sciences pour le vivant (IRTSV, centre de Grenoble), l'Institut de biologie et de technologies de Saclay (iBiTec-S, centre de Saclay)], de la Direction de la recherche technologique [Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux, centre de Grenoble)] et de la Direction de l'énergie nucléaire (centre de Marcoule).

Pour une espèce donnée, l'approche de génétique directe consiste à cribler des collections de mutants et à identifier ensuite le gène conférant l'amélioration recherchée. Une autre approche, dite de génétique chimique, vise à identifier au sein de chimiothèques les composés chimiques capables de modifier le **métabolisme** lipidique des microalgues. Ces approches multidisciplinaires sont mises en œuvre dans les laboratoires de la DSV.

La production de lipides extracellulaires

La transformation en biodiesel des lipides de réserve accumulés par les microalgues nécessite de récolter la biomasse et d'en extraire l'huile, deux étapes qui, à elles seules, représentent actuellement environ 70 % du coût de production. La sécrétion continue de lipides par les cellules de microalgues constituerait une avancée importante susceptible de réduire drastiquement le coût du biodiesel, car l'huile produite dans le milieu de culture pourrait être récoltée par simple séparation de phase.

La sécrétion de lipides en grande quantité, rarement observée chez les microalgues, existe chez toutes les **plantes supérieures**. Les cellules épidermiques de ces dernières sont en effet spécialisées dans la sécrétion de divers lipides destinés à protéger la plante du dessèchement dû à l'atmosphère terrestre. Des recherches visant à comprendre l'évolution des voies de biosynthèse et de sécrétion des lipides extracellulaires, afin de les stimuler ou de les introduire dans les microalgues, sont actuellement menées à la DSV. Les efforts portent en particulier sur la famille des **alcanes**, directement utilisables comme carburants.

La biosynthèse d'éthanol

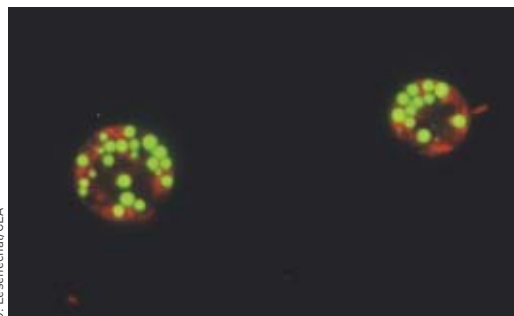
Le **bioéthanol** de 1^{ère} génération, abondamment employé sous forme de mélanges avec l'essence, est produit à partir de plantes sucrières ou céréalières. Après extraction, les sucres simples (glucose) ou **polymérisés** (amidon) sont transformés par des **levures** en bioéthanol. Des recherches conduites au CEA visent à fabriquer directement du bioéthanol en couplant, chez des cyanobactéries, le métabolisme photosynthétique à la production d'éthanol. Pour ce faire, les **enzymes** permettant la biosynthèse de l'éthanol, telle la pyruvate décarboxylase et l'alcool déshydrogénase (qui provient de la levure), sont produites dans la cyanobactérie modèle *Synechocystis*.

Développement et utilisation de modèles biologiques

Les recherches en biologie progressent grâce au développement de modèles biologiques appropriés. Ainsi, le colibacille (*Escherichia coli*) chez les **bactéries**, l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*) chez les plantes, ou la souris chez les mammifères, se sont imposés comme des modèles de choix. Différents modèles de microalgues ont émergé au cours de ces dernières années.

• *Synechocystis* et les cyanobactéries

Apparues il y a 3 milliards d'années, les cyanobactéries sont à l'origine de l'oxygène que nous respirons. Ces organismes très simples et extrêmement robustes sont aussi à la source, par endosymbiose, des chloroplastes des cellules végétales. Même si les cyanobactéries



Accumulation de lipides de réserve chez un mutant de l'algue verte modèle *Chlamydomonas reinhardtii* vue au microscope à fluorescence. Les lipides, stockés dans des structures sphériques appelées oléosomes, apparaissent colorés en vert.

n'accumulent pas naturellement de lipides de réserve, elles sont souvent utilisées comme modèle unicellulaire pour l'étude de la photosynthèse. En outre, certaines d'entre elles, telle *Synechocystis*, sont facilement modifiables par ingénierie métabolique pour la production de biocarburants (alcools, alcanes...).

• *Chlamydomonas reinhardtii* et les chlorophycées

Chlamydomonas reinhardtii est une algue verte unicellulaire d'eau douce souvent présente dans les sols. Son génome a été récemment séquencé et de nombreux outils de modification des génomes ont été mis au point chez cette espèce. Cette algue a été utilisée comme organisme modèle pour l'étude de nombreux processus biologiques dont la photosynthèse, la fonction des flagelles, la photo-production d'hydrogène et, plus récemment, l'accumulation de lipides. Plusieurs autres microalgues ont émergé depuis peu comme modèles d'étude. Ainsi, le génome de *Chlorella*, une espèce d'intérêt industriel, a été séquencé.

• Les chromalvéolés:

Phaeodactylum, *Nannochloropsis*

De nombreux organismes unicellulaires, appelés par excès de langage microalgues – il s'agit en fait des protistes – ont une architecture cellulaire complexe. C'est le cas des diatomées, dont l'apparition au cours de l'évolution suit l'inclusion d'une algue rouge à l'intérieur d'une cellule non photosynthétique. Cette association, appelée endosymbiose secondaire, a été à la source d'un groupe extrêmement vaste de protistes, nommés chromalvéolés, et couvrant des êtres aussi divers que des espèces photosynthétiques marines (comme la diatomée *Phaeodactylum tricornutum*, dont le génome a été intégralement séquencé), ou des parasites de l'homme (dont *Plasmodium*, l'agent du paludisme) étudiés depuis plus d'une décennie dans les laboratoires du CEA.

Des travaux récents ont montré que la transformation de *Nannochloropsis*, une microalgue d'intérêt industriel, procédait par **recombinaison homologue**, ce qui permet d'envisager des modifications ciblées du génome.

Les procédés de culture, de récolte et de traitement de la biomasse

Les microalgues sont cultivées soit dans des systèmes extensifs ouverts – il s'agit généralement de *raceways* – soit dans des systèmes intensifs fermés, les photobioréacteurs, qui permettent d'atteindre une meilleure productivité mais à un coût plus élevé. Des études technico-économiques menées au CEA montrent que les innovations et optimisations des procédés (culture, récolte, extraction des composés d'intérêt, transformation en biocarburant) constituent des enjeux de la filière au même titre que les améliorations



scénario	ratio énergétique net	coût de production (€/L de biodiesel)	émission de gaz à effet de serre (kg de CO ₂ -équivalent/100 km)	consommation d'eau (L d'eau/L de biodiesel)
	valeurs moyennes			
référence	1,1	1,4	20,5	1 520
innovant	2,2	2,8	9,1	340
diesel de pétrole	5,4 ⁽¹⁾	0,6 ⁽²⁾	20,2 ⁽¹⁾	15 ⁽³⁾

(1) Francesco CHERUBINI, Neil D. BIRD, Annette COWIE, Gerfried JUNGMEIER, Bernhard SCHLAMADINGER, Susanne WOESS-GALLASCH, «Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations», *Resour. Conserv. Recy.* 53, 2009, p. 434-447.

(2) EIA, Gasoline and Diesel Fuel Update, Avril 2011. Disponible sur : <http://www.eia.gov/oog/info/gdu/gasdiesel.asp>.

(3) Carey W. KING, Michael E. WEBBER, «The Water Intensity of the Plugged-In Automotive Economy», *Environ. Sci. Technol.* 42, 2008, p. 4305-4311.

Tableau.

Résultat d'une étude technico-économique comparant un scénario de référence et un scénario innovant pour la production de biodiesel. Le scénario de référence correspond au procédé le plus rencontré dans la littérature. Il comprend les étapes suivantes : culture en *raceway* (lagunes à haut rendement), séchage par centrifugation et par sécheur tambour à gaz, extraction des lipides par *n*-hexane, transestérification des lipides et digestion anaérobie des résidus de microalgues (issus de l'étape d'extraction des lipides). Le scénario innovant est un procédé optimisé composé des étapes suivantes : culture en système hybride *raceway*/photobioréacteur, séchage par filtre presse, extraction des lipides en voie humide par diméthyl-éther, hydrodésoxygénation des lipides et digestion anaérobie des résidus de microalgues. Le ratio énergétique net représente le rapport entre l'énergie produite et l'énergie primaire consommée.

liées à la biologie décrites précédemment, notamment celles portant sur la productivité en lipides. Les premières conclusions d'une étude technico-économique en cours révèlent que la culture est une étape primordiale puisqu'elle est à l'origine de 30 à 60 % du coût de production des biocarburants. Ainsi, de nombreuses innovations technologiques sont attendues dans ces systèmes de culture afin de les rendre plus performants et moins onéreux.

Pour obtenir du biodiesel, l'extraction des lipides contenus dans le microorganisme est nécessaire. La méthode de référence actuelle consiste à récolter les microalgues par centrifugation, à les sécher et à en extraire les lipides à l'aide d'un solvant. Cependant, la consommation énergétique de ces technologies, pour le séchage notamment, est un verrou au développement de la filière à grande échelle. La recherche actuelle se concentre sur des technologies innovantes et propres qui permettraient d'extraire les lipides à partir de microalgues humides (tableau). Le CEA s'intéresse en particulier à des technologies basées sur les fluides sous pression. Parmi celles-ci, citons : la liquéfaction hydrothermale, qui transforme une biomasse humide en une biohuile de bonne qualité avec des rendements prometteurs, l'extraction et la transestérification directe des lipides en milieu alcoolique supercritique pour produire du biodiesel, et l'extraction et le fractionnement des lipides en CO₂ supercritique, qui permet de récupérer, outre les lipides, d'autres molécules d'intérêt susceptibles de rentabiliser la filière (nutraceutiques, molécules pour les industries pharmaceutiques et la chimie fine).

Une fois extraits, les lipides sont transformés en biodiesel en utilisant des procédés chimiques de transestérification ou d'hydrotraitement qui ne nécessiteront

pas *a priori* de gros efforts en R&D hormis l'adaptation et l'optimisation des technologies existantes aux spécificités des lipides issus de microalgues.

Relever le défi de la rentabilité économique

Si les microalgues apparaissent comme une voie prometteuse pour la synthèse de biocarburants de 3^e génération, des améliorations importantes doivent être apportées, aussi bien au niveau des capacités de production des souches que des procédés de culture, de récolte et d'extraction. Il faudra significativement accroître la productivité tout en diminuant les coûts d'élaboration pour espérer atteindre une rentabilité économique pour la production d'énergie. Les défis de la filière microalgues ne pourront donc être relevés qu'en menant ces recherches de manière concertée entre biologistes et technologues. Le CEA, qui dispose de fortes compétences en biologie et en génie des procédés, est particulièrement bien positionné.

> Fred Beisson¹, Yonghua Li-Beisson¹, Gilles Peltier¹, Giovanni Finazzi², Éric Maréchal², Franck Chauvat³, Florian Delrue⁴, Karine Froment⁴ et Vincent Blet⁵

¹Institut de biologie environnementale et biotechnologie (iBEB)
Direction des sciences du vivant
CEA Centre de Cadarache

²Institut de recherches en technologies et sciences pour le vivant (iRTSV)
Direction des sciences du vivant
CEA Centre de Grenoble

³Institut de biologie et de technologies de Saclay (iBiTec-S)
Direction des sciences du vivant
CEA Centre de Saclay

⁴Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble

⁵Département d'études du traitement et du conditionnement des déchets (DTCD)
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Marcoule

Les lipides produits par les microalgues sont analysés par chromatographie liquide haute performance et spectrométrie de masse.



G. Lesénchal/CEA

Axes de R&D du CEA pour développer des énergies bas carbone économiquement et socialement viables

Le programme NTE (Nouvelles technologies de l'énergie) du CEA est centré sur «une énergie bas carbone» avec au menu le déploiement de filières pour la production de vecteurs énergétiques bas carbone (électricité et chaleur d'origine solaire, hydrogène, biocarburants), l'adaptation entre l'offre et la demande (stockage, intelligence des réseaux) et certains usages de l'énergie, notamment transports et bâtiments bas carbone.

Il a pour objectif de développer les énergies renouvelables et les systèmes énergétiques innovants pour les rendre économiquement et socialement attractifs. Cela implique de s'intéresser à l'ensemble de la chaîne de la valeur du produit ou du système, de sa conception à sa fin de vie, dans une approche globale. Quelle que soit la filière choisie, les moteurs de recherche qui sous-tendent les travaux du programme NTE peuvent ainsi être classés en cinq grands thèmes, qui sont systématiquement et simultanément traités.

L'éco-conception

Dès la conception d'un composant (cellule solaire, **pile à combustible**, **batterie**...), les matériaux sont choisis en respectant plusieurs critères environnementaux et économiques. Ils doivent être abondants (sûreté d'approvisionnement, stabilité des coûts), non toxiques et non polluants. C'est le cas du composé LiFe_3PO_4 (phosphate de fer lithié) sélectionné comme matériau actif d'**électrode** de batterie, afin d'éviter le cobalt, matériau très spéculatif. Des études sont également menées pour mettre au point les procédés de recyclage et assurer, dans la mesure du possible, une valorisation *via* la «réemployabilité» des matériaux. Il s'agit, par exemple, de récupérer le platine des électrodes de pile à combustible, le **silicium** purifié des processus de découpe des *wafers* (fines plaques) de silicium pour le **photovoltaïque**...

La maîtrise des coûts

Deux types d'approche permettent de réduire les coûts et de minimiser l'impact environnemental des technologies. En premier lieu, l'un des axes majeurs de R&D pour abaisser les coûts de

production, d'usage et d'impact environnemental est le gain en performances, avec entre autres l'accroissement des durées de vie et des rendements des composants et des systèmes. Par ailleurs, que ce soit lors de la conception ou au cours du développement des méthodes de fabrication, la recherche vise à diminuer les coûts matière (par exemple par l'emploi de matériaux finement divisés ou en couches minces, voire de **nanomatériaux**, pour limiter la quantité de matière nécessaire), les coûts procédés (telle la baisse du coût énergétique par l'augmentation de la taille des lingots de silicium) ou encore le coût environnemental (techniques d'enduction de matériaux d'électrodes en voie aqueuse plutôt que par solvant...).

La maîtrise des coûts à l'usage

La réduction des coûts d'usage est réalisée, notamment par le développement de l'intelligence du contrôle-commande, de l'apprentissage des habitudes de l'utilisateur et donc d'une capacité d'anticipation du système : c'est le cas du chauffage des bâtiments en heure creuse, du stockage d'une partie de la production photovoltaïque pour une utilisation ultérieure (adaptation entre l'offre et la demande) ou encore du stockage d'eau chaude solaire. Cette étape passe par la mise au point de capteurs et de logiciels. La diminution des coûts de maintenance, par exemple par du diagnostic et du dépannage en ligne, est aussi prise en considération.

Les usages et l'interface homme-machine

Des recherches sont également conduites en amont pour affiner les usages, voire en imaginer de nouveaux, pour les composants et systèmes mis au point, développer la convivialité de l'interface homme-machine, aider l'utilisateur dans ses choix (contrôle-commande), assurer l'interopérabilité du composant ou du système avec son environnement (la recharge des batteries automobiles devra être possible partout, indépendamment de sa nature et de son fournisseur). Enfin – et c'est une priorité au CEA – de nombreux développements sont menés pour garantir la sûreté de

fonctionnement de ces composants et systèmes. Il convient de citer les travaux de détection d'arc électrique, causé par la rupture du câble reliant le panneau solaire au convertisseur de tension, sur les systèmes photovoltaïques (pour éviter, en particulier, les risques d'incendie), les *Battery Management Systems* (BMS) protecteurs de chaque cellule des **packs de batteries** automobiles (pour prévenir, par exemple, toute réaction chimique dangereuse), les capteurs de déformation des dispositifs de stockage d'hydrogène...

L'analyse technico-économique et de cycle de vie

Tous ces travaux s'accompagnent d'études systématiques des coûts, par des analyses technico-économiques des procédés de production et des conditions d'usage des composants et des systèmes (calcul du prix de revient d'un litre de biocarburant, d'un **kWh** d'électricité photovoltaïque, du coût carbone des technologies, en usage comme dans les étapes de fabrication...). Les études peuvent aussi être étendues à la détermination des conditions économiques du déploiement d'une filière (**biomasse**, photovoltaïque, solaire à concentration...) à l'échelle nationale ou internationale. Ces travaux sont couplés à des analyses multicritères de cycle de vie, dont l'impact en gaz carbonique (CO_2).

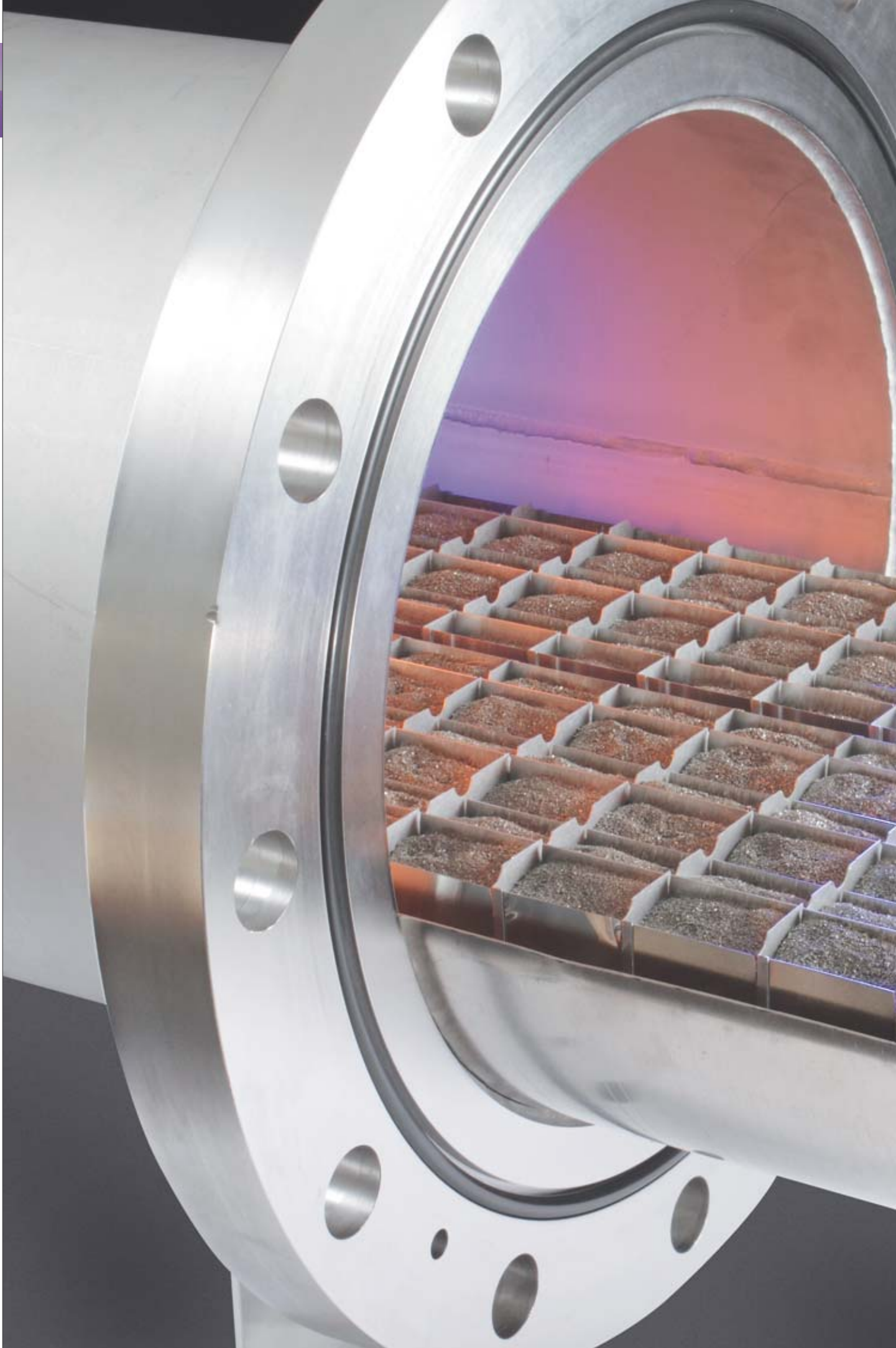
La pluralité des compétences du CEA lui permet sur toutes les filières étudiées (solaire, biomasse, réseaux, mobilité, bâtiment...) de développer une approche intégrée allant du matériau au composant puis au système, et de la recherche fondamentale à la mise au point de lignes pilotes de production (batteries, **cellules** et **modules photovoltaïques**...).

> **Nicole Mermilliod**¹
et **Hélène Burlet**²

¹Direction du Programme transversal «Nouvelles technologies de l'énergie»

²Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique

CEA Centre de Grenoble



II. TRANSFORMATION, STOCKAGE, TRANSPORT ET DISTRIBUTION

Le début du XXI^e siècle est marqué par une prise de conscience durable des problèmes énergétiques auxquels notre planète doit faire face. Ce défi engendre une modification profonde de notre approche énergétique, qui cherche non seulement à diversifier les sources d'énergie mais également à introduire de nouveaux vecteurs d'énergie pour répondre à nos comportements nomades. En effet, si pendant longtemps l'homme s'est sédentarisé autour de foyers énergétiques directement utilisables, il doit désormais développer et optimiser des technologies innovantes de transformation, stockage, transport et distribution d'énergie. L'électricité est au centre de ce nouveau bouquet énergétique, mais son usage nécessite à chaque instant un parfait équilibre entre la puissance demandée et la puissance fournie. Cette difficulté s'accroît avec la mise en place d'un marché dérégulé de l'électricité, qui favorise le déploiement toujours croissant de moyens de production décentralisés de puissances très variables (3 kW à plusieurs MW) à partir d'énergies intermittentes et aléatoires (éolien, solaire...).

Ce nouveau paradigme pour le marché de l'électricité constitue ainsi une opportunité sans précédent pour le développement et le déploiement des énergies renouvelables, mais aussi pour la mise au point de stratégies de gestion de réseaux électriques. La prévision des productions d'énergies renouvelables, le délestage programmé et surtout le stockage de l'électricité à différentes échelles de temps (batteries pour quelques minutes à quelques heures, hydrogène pour quelques heures à quelques jours) vont participer à la stabilité et la sécurité de nos réseaux électriques. Ces technologies, associées aux TIC (Technologies de l'information et de la communication) et à des algorithmes de gestion de systèmes complexes, vont fournir de l'intelligence aux réseaux (smart grid) et permettre la prévention de *blackout* (dizaines de milliards de \$/an), l'alimentation de sites isolés et l'effacement des pointes de demande (report d'investissement d'infrastructures), l'augmentation du seuil d'intégration des énergies renouvelables (30 % actuellement), le lissage des coûts et une rentabilité accrue de procédés industriels énergivores (profitant de la grande variabilité des prix sur le marché EPEXSPOT).

Les difficultés énergétiques auxquelles sont confrontés aujourd'hui les milieux insulaires préfigurent celles que rencontrera la planète à plus ou moins long terme. Par leurs spécificités énergétiques (gisement important d'énergies renouvelables, bouquet énergétique majoritairement fossile, accès à l'énergie complexe et coûteux, réseau intrinsèquement plus fragile et plus sensible), ces territoires sont des laboratoires uniques pour éprouver les nouvelles technologies de stockage et de gestion de l'énergie. Le CEA a ainsi choisi de s'associer au CNRS et à l'Université de Corse pour implanter en Corse une antenne applicative de l'Institut national de l'énergie solaire, avec le soutien financier de la Collectivité territoriale de Corse, de l'État français et de l'Union européenne. Cette antenne développe trois plateformes de recherche technologique dédiées à la gestion de micro-réseaux électriques (PAGLIA ORBA), au couplage d'une chaîne hydrogène sur un réseau (MYRTE) et à la mobilité électrique multimodale (MOBIDIC).

Les briques technologiques présentées dans ce chapitre préparent et concourent à ce nouveau paysage énergétique pour davantage d'énergie renouvelable, d'indépendance énergétique, de sécurité d'approvisionnement et d'activités économiques génératrices d'emploi.

► **Pierre Serre-Combe**

Institut Liten (Laboratoire d'innovation
pour les technologies des énergies nouvelles
et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble



Le développement de batteries performantes, présentant des capacités, coûts et durées de vie améliorés, tout en offrant des garanties de sécurité, est un enjeu majeur pour le déploiement de systèmes énergétiques sobres en énergie et non polluants, qu'il s'agisse d'applications mobiles ou stationnaires. Dans le cadre de son programme de R&D sur les Nouvelles technologies de l'énergie (NTE), **le CEA est ainsi devenu un acteur incontournable dans la conception et la mise en œuvre de technologies de stockage innovantes** pour les transports (véhicules électriques et hybrides), les applications en sites isolés et les applications en connexion au réseau, pour le lissage des pointes de consommation et le décalage de production.

Énergie en batteries

Des batteries pour la mobilité électrique

Depuis les années 2000, le CEA consacre une grande part de ses efforts à des travaux de R&D sur les batteries pour les véhicules électriques et hybrides. Ces activités font l'objet de nombreux échanges avec les acteurs de l'industrie.

Mise au point et validation du système de gestion du pack batterie du véhicule démonstrateur du CEA. Ce véhicule a été développé en partant d'une Citroën AX électrique des années quatre-vingt-dix, qui était à l'époque le véhicule électrique le plus léger.



P. Avavian/CEA

Le transport routier est à l'origine de plus de 90 % des émissions de gaz carbonique (CO₂) du secteur des transports, dont 50 % pour les seuls véhicules particuliers. Le développement de véhicules propres est ainsi une des priorités des politiques publiques. Ce domaine est activement exploré par le CEA. De nombreux programmes de R&D sur les **véhicules** électriques et **hybrides** sont proposés par ses chercheurs, notamment à l'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux). Ils sont menés en lien avec les autres acteurs de la recherche publique et les industriels, en particulier dans le cadre du **Réseau national de recherche et technologie sur les batteries**.

Les technologies de batteries

Plusieurs types d'**accumulateurs** ont été développés pour la conception des **batteries**. Les accumulateurs plomb-acide, nickel-cadmium (NiCd) et nickel-hydrure métallique (NiMH) sont basés sur des technologies aqueuses. L'**électrolyte** est composé soit d'acide sulfurique dilué dans de l'eau, dans le cas des batteries au plomb, soit de potasse diluée dans de l'eau, pour les batteries NiCd et NiMH. Outre la réaction électrochimique principale, la présence d'eau entraîne la réalisation de nombreuses réactions électrochimiques parasites, qui influencent les performances et l'utilisation des accumulateurs. Les réactions parasites provoquent notamment l'**autodécharge** des accumulateurs. Cependant, ces

Les accumulateurs lithium-ion

Le principe de fonctionnement des **accu-mulateurs** lithium-ion (Li-ion) repose sur le transfert d'ions lithium (Li^+) qui vont s'insérer, soit dans le matériau de la **cathode** (pôle positif), soit dans celui de l'**anode** (pôle négatif).

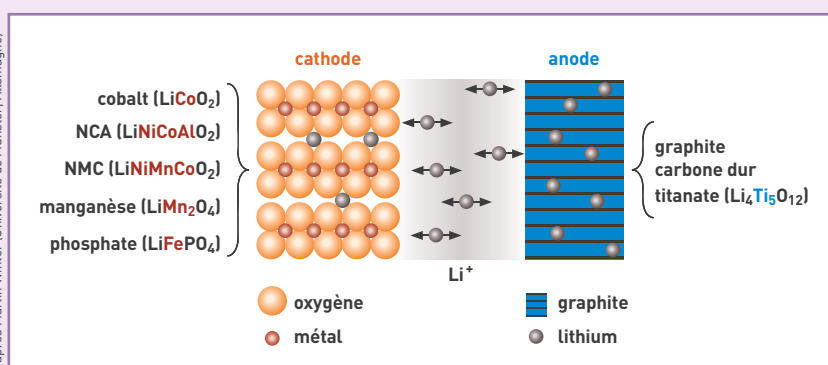
Le choix du matériau de cathode est un compromis entre l'énergie stockée, le coût et la sécurité. Les matériaux actifs sont essentiellement des oxydes mixtes de lithium et de **métaux de transition**. Initialement, les applications des accumulateurs Li-ion concernaient principalement

les ordinateurs et téléphones portables. L'oxyde de cobalt apportait des **densités d'énergie massique** (Wh/kg) et **volumique** (Wh/L) très intéressantes, mais c'est un matériau cher et réactif. Le remplacement d'une partie du cobalt par de l'aluminium (NCA pour Nickel-Cobalt-Aluminium - NiCoAl) ou du manganèse (NMC pour Nickel-Manganèse-Cobalt - NiMnCo) permet d'optimiser les compromis coût, sécurité et densité d'énergie massique. La technologie basée sur le manganèse intéresse beaucoup les constructeurs

automobiles car son prix matière est peu élevé, pour des densités d'énergie massique et volumique importantes. En revanche, cette technologie doit faire ses preuves en termes de durée de vie calendaire (vieillessement naturel de la batterie au cours des années) et de **cyclage**. Le phosphate de fer présente le meilleur niveau de sécurité, un faible coût, procure une forte puissance, mais au détriment de densités d'énergie massique et volumique inférieures. Ce matériau est maintenant bien positionné sur les marchés de l'outillage électroportatif et des véhicules électriques, aux États-Unis et en Chine principalement.

Les matériaux utilisés pour l'anode sont majoritairement à base de carbone (graphite, **fibre de carbone**...). L'emploi de titanate ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) autorise des gains très importants au niveau du nombre de **cycles** pouvant être atteints ainsi qu'à celui de la puissance de l'accumulateur, à la décharge et surtout à la charge. Mais la tension de l'accumulateur est abaissée d'environ un volt, ce qui influe fortement sur les densités d'énergie massique et volumique.

d'après Martin Winter (Université de Münster, Allemagne)



technologies présentent l'intérêt de permettre la charge d'une batterie constituée d'accumulateurs en série sans qu'il soit nécessaire d'ajouter un circuit électronique en parallèle des accumulateurs. Dans de telles batteries, un accumulateur achevant sa charge avant les autres pourra continuer à être traversé par le courant de charge. Classiquement, une autre réaction électrochimique sera amorcée et dissipera l'énergie reçue sous forme de chaleur. Le courant terminera la charge des autres accumulateurs en série.

Dans un accumulateur lithium-ion (Li-ion), une seule réaction électrochimique se produit, sans réaction parasite annexe (encadré). Le courant d'auto-décharge est très faible, presque inexistant, ce qui offre la possibilité de stocker de l'énergie pour des durées supérieures à un an. Cela constitue un avantage particulièrement significatif pour le stockage d'énergie destiné aux applications nomades ou intermittentes, comme l'outillage électroportatif. Ainsi, plus besoin de recharger la batterie d'une visseuse électrique avant de s'en servir. En revanche, il est interdit de continuer à faire passer du courant dans un accumulateur totalement chargé. Une électronique est nécessaire pour mesurer la tension aux bornes de chaque accumulateur et arrêter la charge lorsque la tension de fin de charge d'un des accumulateurs est atteinte. Cette électronique doit aussi assurer un équilibrage des accumulateurs, c'est-à-dire permettre d'achever la charge des accumulateurs les moins chargés de la mise en série. Après une charge, le déséquilibre est très faible, classiquement

moins de 1 % (figure 1). Le déséquilibre n'a pas d'impact immédiat sur l'usage et la batterie peut être utilisée aussitôt après la charge. Cependant, il est indispensable de réaliser périodiquement l'équilibrage pour éviter que le déséquilibre ne dérive et s'amplifie, charge après charge.

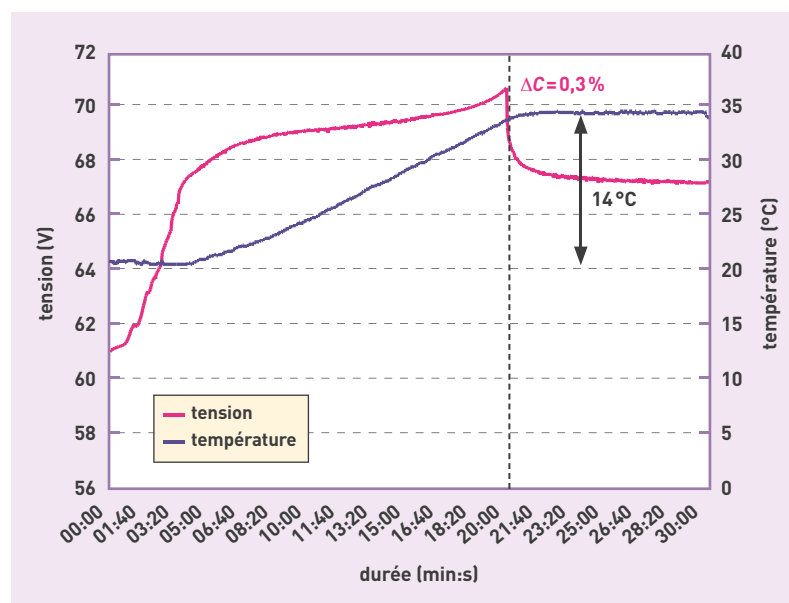


Figure 1. Déséquilibre de 0,3 % observé sur un **pack batterie** LiFePO_4 utilisé sur le véhicule électrique démonstrateur du CEA (une Citroën AX), après une charge rapide en 20 minutes à température ambiante.



Un contrôle électronique

Les batteries d'accumulateurs Li-ion doivent impérativement être munies d'une électronique de gestion (BMS, *Battery Management System*). Celle-ci assure la surveillance en tension de tous les accumulateurs, pour arrêter la charge sur un seuil de tension haute et stopper la décharge sur un seuil de tension basse. Elle contrôle également la température de la batterie, calcule l'autonomie qui lui reste et indique la puissance maximale qu'elle peut fournir ou absorber en phase de récupération, au freinage et en descente. Enfin, l'électronique de gestion informe sur l'état de vieillissement de la batterie, notifie ses défauts et gère l'équilibrage en tension des accumulateurs (figure 2). L'état de charge est l'indicateur classique de l'autonomie restante. À la charge, on intègre le courant au cours du temps afin de connaître le nombre d'**ampères-heures** entrés dans la batterie. Le même calcul s'effectue pendant le roulage. Le décompte de la charge disponible permet d'estimer l'autonomie restante. Dans le cas des accumulateurs Li-ion, l'intégration du courant au cours du temps, avec recalage en fin de charge, lors de l'atteinte de la tension maximale, conduit à une meilleure précision de l'autonomie.

L'état de santé d'une batterie est évalué en fonction de la baisse de sa **capacité**, exprimée en pourcentage. Classiquement, une batterie est considérée comme étant en fin de vie après une perte de capacité de 20 à 30 %.

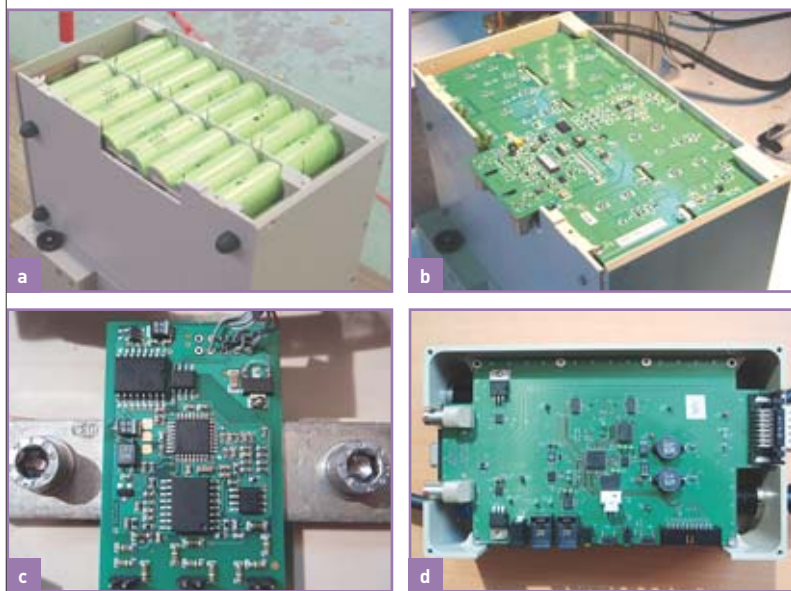


Figure 2.

Électronique de gestion de packs batteries. Ces packs sont formés de l'assemblage de plusieurs unités d'un module standard développé au CEA. Chaque module est muni d'une carte de mesure de tension, de température et d'équilibrage. Les informations sont ensuite isolées électriquement et transmises par réseau CAN (*Controller Area Network*), le réseau communicant standard de l'automobile. Une mesure de courant est placée sur le circuit de courant de puissance. Une résistance shunt de faible valeur permet d'apporter une grande précision sur toute la plage de mesure, aussi bien en phase de roulage – 200 ampères (A) maximum pour une batterie de 400 volts (V) – qu'en phase de charge – moins de 10 A pour la même batterie en charge lente. De même, une carte positionnée sur le shunt a pour rôle de transmettre les informations avec isolement électrique sur le réseau CAN. La carte centrale à microcontrôleur du BMS assure les fonctions de gestion et de calcul à partir des informations reçues.

En a, module d'accumulateurs Li-ion à base de phosphate de fer (LiFePO_4) issus de l'outillage électroportatif. En b, carte de mesure et d'équilibrage connectée directement sur les accumulateurs. En c, shunt de mesure de courant. En d, carte à microcontrôleur comprenant les **algorithmes** de surveillance, sécurité, équilibrage et calculs des états (charge, énergie, santé, sécurité, puissances maximales en décharge et recharge...).

Les accumulateurs Li-ion ne peuvent pas être totalement déchargés, sous peine de détérioration. Leur assemblage pour constituer une batterie est donc une opération qui comporte des risques de court-circuit et d'électrisation⁽¹⁾. Pour minimiser ces risques, une conception par modules de tension non dangereuse, qui seront connectés en série le plus tard possible, a été choisie.

Les batteries et leur coût d'usage

Dans les années quatre-vingt-dix, 10 000 véhicules électriques de marques Peugeot, Citroën et Renault ont été vendus, suite à l'obligation faite aux administrations de disposer d'une part de véhicules électriques. La production a ensuite été abandonnée. Les médias communiquent aujourd'hui sur le fait que les véhicules électriques ne se sont pas développés à cause d'une autonomie insuffisante. Si cela est indéniable, la raison première de cet arrêt. Le retour d'expérience de ces véhicules a en effet montré que le problème principal résidait dans le coût d'usage de ces véhicules, alors trois fois plus élevé que celui des véhicules thermiques. L'énergie extraite de la batterie lors du roulage n'atteignait pour une NiCd que 70 % de celle annoncée, du fait de la différence entre les conditions d'usage (décharge en une heure) et celles des spécifications constructeurs (décharge en trois heures). Sur d'autres véhicules, à base de batterie au plomb, l'énergie extraite était même inférieure de 50 % à la spécification (spécification pour une décharge en 10 heures au lieu de 1 heure). Le nombre de **cycles** en utilisation réelle était également très inférieur à celui des spécifications. Au lieu de durer 100 000 km, les batteries devaient être changées au bout de trois ou quatre ans et après 30 000 à 40 000 km. Quant au coût d'usage du stockage de l'énergie⁽²⁾, il était de l'ordre de 1,5 €/kWh pour les voitures des années quatre-vingt-dix, alors qu'il doit être inférieur à 0,5 €/kWh pour être compétitif avec le coût de l'énergie issue du carburant, une fois pris en compte le rendement du moteur thermique. Dans ce calcul, le coût de l'électricité à la prise est négligé, car aujourd'hui très inférieur au coût d'usage du stockage.

Avec les véhicules hybrides, il est possible d'atteindre un coût d'usage du stockage de l'énergie compétitif en faisant fonctionner la batterie uniquement avec des microcycles de 5 %. Ainsi, une batterie NiMH, spécifiée pour 1 000 cycles de charge-décharge complets, peut faire 100 000 cycles de 5 %. Le coût d'usage est alors divisé par cinq. C'est l'un des atouts des véhicules hybrides à dérivation de puissance tels que la Toyota Prius : à tout instant, le véhicule choisit s'il vaut mieux employer l'essence ou l'électricité stockée dans la batterie. Pour les véhicules électriques, donc sans source d'énergie complémentaire, les batteries sont utilisées en cycles complets. Aujourd'hui, un coût d'usage compétitif est accessible grâce aux baisses des coûts liées à la production en volume et à l'accroissement régulier du nombre de cycles en usage réel.

(1) Électrisation : passage de courant électrique dans le corps humain, pouvant entraîner des lésions, voire le décès.

(2) Coût d'usage du stockage de l'énergie : coût d'achat du stockage (en €/kWh, où l'énergie est celle réellement disponible en utilisation) divisé par le nombre de cycles en usage réel.

Les véhicules doivent être légers pour minimiser la taille de la batterie, donc ses coûts d'achat et d'usage. Une grande part des véhicules électriques actuels sont des véhicules thermiques électrifiés. Avec la « diésélisation » du parc, les besoins d'insonorisation associés et le renforcement de la sécurité passive et active des véhicules, leur masse s'élève à 1 100-1 300 kg. L'électrification conduit à une masse finale de l'ordre de 1 500 kg et à l'obligation d'inclure une batterie de 25 à 30 kWh pour assurer 160 km d'autonomie. La taille du véhicule et celle de la batterie influent fortement sur les coûts d'achat et/ou de location, ainsi que sur le coût kilométrique.

Un véhicule beaucoup plus léger et une batterie réduite en proportion sont nécessaires pour garantir la compétitivité des véhicules électriques. Ceci s'avère possible à condition, plutôt que d'électrifier l'existant, de concevoir une voiture électrique optimisée, ce qui est en cours chez les constructeurs, ou de proposer des véhicules différents tels que scooters, trois-roues, quadricycles ou Renault Twizy⁽³⁾.

La recharge rapide

Les accumulateurs lithium peuvent être optimisés en puissance en agissant sur les matériaux d'**électrodes** et leur épaisseur, ainsi que sur les feuillards d'aluminium et de cuivre⁽⁴⁾, pour être en mesure de réaliser des charges rapides. Ceci permet de proposer des véhicules électriques pour des trajets locaux et domicile-travail, avec des charges lentes de nuit en usage régulier, tout en ayant la possibilité d'effectuer de longs trajets avec des successions de roulages et de charges rapides.

La recharge rapide des accumulateurs lithium ouvre également des perspectives nouvelles pour la conception de véhicules, comme l'illustre le projet collaboratif ELiSup (Autobus Électrique à batteries au Lithium et Supercapacités), porté par la société Irisbus.

Pour parvenir à offrir 150 km d'autonomie à un bus, en recharge de nuit, il faut l'équiper d'une batterie dont la masse peut atteindre plusieurs tonnes, ce qui n'est économiquement compétitif que pour une durée de vie de la batterie de dix années. Une autre solution consiste à utiliser des supercondensateurs⁽⁵⁾ dimensionnés pour couvrir la distance inter arrêts, et de placer une station de recharge de forte puissance (200 kW) à chaque arrêt. Cette solution est très fortement pénalisée par le coût de l'infrastructure nécessaire à chaque station. Le projet ELiSup s'attache au développement d'un bus léger, avec une chaîne de traction optimisée et une batterie de puissance chargée en bout de ligne en cinq minutes. L'infrastructure se limite à une borne de recharge de 200 kW à chaque fin de ligne. La taille de la batterie est trois fois plus petite que dans les options précédentes et son coût



CEA/Institut Liten

Le véhicule électrique démonstrateur du CEA a permis de mettre en évidence l'impact de la masse sur les performances. En remplaçant le pack batterie NiCd d'origine, de 12 kWh spécifié (mais de 7 à 8 kWh en réel), par une batterie LiFePO₄ de 10 kWh, puis de 13 kWh, d'une masse divisée par deux, les chercheurs du CEA ont doté ce véhicule d'une autonomie de 130 km en usage réel, de bonnes performances en montage (montée à l'Alpe d'Huez et retour) et d'une recharge rapide. L'autonomie est analogue à celle des voitures électriques d'aujourd'hui, mais avec une batterie deux fois plus petite. Ainsi, une conception adaptée, prenant en compte les contraintes de sécurité actuelles, permettrait de proposer un véhicule électrique de moins d'une tonne, à batterie et coût réduits. Les chercheurs ont également démontré que ce véhicule pouvait parcourir, grâce à la recharge rapide, 780 km en journée et 1 240 km en 24 heures, sur route, autour de Grenoble (Isère).

d'achat diminue en conséquence. Le temps de retour sur investissement est ramené à trois ou quatre ans. Un bus hybride rechargeable et un bus électrique sont mis au point selon ce concept (voir *Les transports électriques*, p. 84).

L'électrification des transports connaît aujourd'hui un développement rapide pour la traction des trains et la propulsion des bateaux (électriques ou **diesel-électriques**), ainsi que pour les commandes électriques des avions et des véhicules. Le but est d'économiser l'énergie tout en augmentant les prestations. Les batteries progressent régulièrement chaque année, portées par les marchés de toutes les applications nomades. Si dans le domaine des microprocesseurs, la loi de Moore indique que le nombre de transistors sur une puce double tous les deux ans, dans celui des batteries, la capacité des accumulateurs croît de 10 % par an. Les performances des batteries et des **piles à combustible** s'améliorent continuellement en termes d'autonomie, de sécurité et de durée de vie. Les coûts d'achat et d'usage deviennent compétitifs. L'objectif est de mettre en circulation en France 400 000 véhicules électriques et hybrides en 2015 et 2 millions à l'horizon 2020.

► Daniel Chatroux

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble

(3) La Twizy, du constructeur automobile Renault, est une voiture électrique biplace en tandem. De petites dimensions (2,34 m de long, 1,24 m de large et 1,45 m de haut), elle affiche une autonomie de 100 km en milieu urbain et peut être rechargée en trois heures et demie. Elle est équipée de batteries Li-ion de 6,1 kWh. Sa masse, batteries comprises, est de 450 kg.

(4) Ils servent à collecter le courant.

(5) Supercondensateur : il récupère l'énergie cinétique lors de la phase de freinage et la transforme en électricité. Capable de se charger et de se décharger très rapidement, il se présente comme une batterie ultra-rapide.



Des batteries pour les applications stationnaires

Le stockage de l'énergie est un enjeu essentiel dans les systèmes de production d'électricité à partir d'énergies intermittentes, particulièrement quand il s'agit de systèmes autonomes. Les travaux menés par le CEA visent à développer des technologies de stockage palliant les faiblesses des systèmes existants.



P. Anavian/CEA

Batterie redox. En stockant de l'électricité photovoltaïque, cette batterie permet de réguler la production et la consommation sur le réseau électrique.

Le stockage de l'électricité est indispensable aux applications en site isolé. Les évolutions réglementaires tendent à lui donner également une place croissante dans les applications connectées au réseau électrique, notamment en conjonction avec la pénétration grandissante de sources intermittentes et fatales (faiblement prédictibles et non contrôlables), telles que le **photovoltaïque** et l'éolien, dans un contexte de progression des réseaux vers plus de flexibilité (smart grids). La loi incitant à l'autoconsommation de l'énergie photovoltaïque en Allemagne et les appels d'offres de la **Commission de régulation de l'énergie (CRE)** sur le couplage des centrales photovoltaïques de grande puissance et éoliennes avec des dispositifs de stockage de l'énergie dans les départements d'outre-mer sont des exemples emblématiques de ces évolutions (voir *L'hydrogène, moyen de stockage de l'électricité*, p. 68).

Le stockage électrochimique

De nombreuses technologies de stockage se positionnent pour répondre à un besoin donné de décalage de charge, de décongestion du réseau, de soutien de la fréquence ou de sécurisation. Parmi elles, le stockage par voie électrochimique, du fait de sa flexibilité de dimensionnement, s'impose naturellement dans les applications de faible puissance/énergie et, de plus en plus, dans des applications de grandes dimensions (**MW/MWh**).

Aborder l'intégration de tels systèmes de stockage implique de travailler à plusieurs niveaux.

Dans la phase de développement technologique, l'attention doit se porter sur l'électrochimie, la formulation de matériaux et la mise au point de nouvelles technologies. L'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux) s'intéresse ainsi, avec les fabricants de technologie, à tous les types d'électrochimie : **accumulateurs** lithium-ion (Li-ion), plomb-acide

sulfurique (Pb-H₂SO₄), plomb-acide méthane sulfonique (Pb-AMS)...

Une fois la technologie arrivée à maturité, il s'agit d'œuvrer à son exploitation dans les meilleures conditions de fonctionnement, et au développement d'indicateurs pertinents pour sa gestion. Ce BMS (*Battery Management System*, système de gestion de batterie) nécessite non seulement une connaissance fine de l'élément unitaire (accumulateur, cellule) et de son électrochimie, mais aussi un interfaçage avec son environnement. Ces travaux sont conduits avec les fabricants et les utilisateurs de technologie.

Enfin, pour la connexion au réseau de puissance, le système de stockage doit intégrer un convertisseur, qui peut aussi être responsable d'une partie du comportement électrique du système.

L'ensemble de ces travaux est sous-tendu par des caractérisations et de la modélisation afin de sélectionner les technologies et le dimensionnement les plus appropriés à l'application.

Le Liten se positionne sur ces trois niveaux de développement, en partenariat avec les fabricants de technologie, les fournisseurs de matériel électrique et les intégrateurs finaux. Certaines technologies électrochimiques – Li-ion, **redox** Pb-AMS – sont mises au point intégralement au Liten. En revanche, les travaux à l'échelle BMS et système sont menés sur les technologies présentes sur le marché, les acteurs industriels donnant accès à leurs éléments unitaires : accumulateurs Li-ion, nickel-zinc (NiZn) et autres à base de Ni, sodium-chlorure de nickel (Na-NiCl₂) fonctionnant à haute température, cellule redox à circulation type vanadium (V)...

Les systèmes redox

Un résultat emblématique des travaux de R&D conduits par le Liten concerne une technologie de **batterie redox** à circulation d'**électrolyte**. Du fait de leurs caractéristiques intrinsèques, ces systèmes de stockage apparaissent comme pertinents dans les gammes de la centaine de **kW/kWh**, en particulier pour le soutien des réseaux électriques de distribution ou de transmission :

- découplage réalisable entre puissance et **capacité** ;
- possibilité d'extension de capacité à bas coût (il suffit d'un réservoir plus grand) ;
- absence d'**autodécharge** en mode déconnecté ;
- stabilité en fonctionnement (durée de vie) ;
- absence d'effet mémoire⁽¹⁾ permettant un **cyclage** sur la totalité de la gamme d'états de charge ;

(1) Effet mémoire : si la batterie n'est pas complètement déchargée, au cycle de charge-décharge suivant, seule une fraction de la capacité est accessible. Aussi, en l'absence d'effet mémoire, la batterie peut être chargée-déchargée (cyclée) sur toute sa gamme d'états de charge, sans impact de sa profondeur de décharge sur son état de santé.

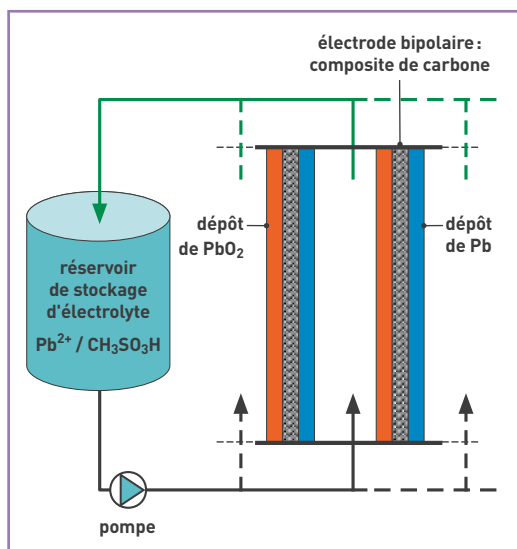


Figure 1. Schéma de principe d'une batterie redox à circulation Pb-AMS de configuration bipolaire (réacteur bipolaire). Ce type de batterie, pour lequel le plomb (sous forme de Pb^{2+}) est en solution dans l'AMS, dans un réservoir unique, ne nécessite qu'un seul système de pompage. Le Pb^{2+} se dépose sur les électrodes sous formes de Pb et de dioxyde de plomb (PbO_2) au cours de la charge.

- sensibilité peu élevée à la décharge profonde, c'est-à-dire presque totale.

Deux technologies redox à circulation arrivent aujourd'hui à maturité commerciale, les batteries zinc-brome (ZnBr) et les batteries vanadium (V). Elles présentent cependant des points faibles en termes de durabilité, de complexité du système fluide et de toxicité des électrolytes.

Les batteries Pb-AMS

Le système Pb-AMS développé au sein du Laboratoire de stockage de l'électricité (LSE) du Liten est une technologie de conception plus simple que les systèmes redox ZnBr et V. Elle pallie leurs faiblesses par une approche originale basée sur l'utilisation du plomb en solution dans de l'acide méthane sulfonique. À terme, cette technologie (figure 1) présentera les avantages suivants :

- un compartiment de réaction unique, d'où un seul réservoir d'électrolyte et un seul système de pompage ;
- l'absence de membrane, ce qui permet de s'affranchir des problèmes de pollution des électrolytes dus au passage des espèces à travers la membrane (*cross-flow*), et donc de fonctionner à forte puissance (ce n'est pas le cas pour les technologies actuelles) ;
- des **électrodes** de grande surface active avec une architecture monopolaire, améliorant la fiabilité et l'étanchéité du système ;
- l'éco-conception en amont de la technologie et l'emploi d'un électrolyte non toxique, l'AMS ;
- un faible coût, grâce notamment à l'usage d'un couple électrochimique basé sur le plomb, avec un objectif inférieur à 80€/kWh installé (coût moyen pour les batteries plomb-acide) et 0,1€ par kWh déstocké sur la durée de vie.

Ce système est étudié par l'équipe de Derek Pletcher à l'Université de Southampton (Royaume-Uni) depuis 2004. À ce jour, les performances ont atteint 100 **cycles** pour une cellule unitaire d'une surface de

100 cm², dans une configuration de type bipolaire. Les travaux se poursuivent. De nombreux points sont encore à améliorer, en particulier la **cyclabilité** et la mise en série des cellules.

Le fonctionnement du système Pb-AMS montre des analogies avec les batteries Pb-H₂SO₄ conventionnelles. Cependant, dans ces batteries, le plomb représente la plus grande partie du coût et son taux d'utilisation n'est que de 25 % environ : 40 à 50 % du plomb est sous forme de collecteur de courant et la matière active n'est employée qu'à 40-50 %. Au contraire, dans la batterie à circulation Pb-AMS, le plomb peut être exploité jusqu'à 95 % car la circulation d'électrolyte élimine la limitation par diffusion. De plus, l'usage d'un électrolyte unique simplifie beaucoup le *design* du système. L'AMS présente également des avantages environnementaux. Il s'agit d'un acide organique, biodégradable, formé lors de l'**oxydation** par le chlore du méthanthiol (CH₃SH). Ce dernier est synthétisable par des microorganismes, ce qui permet d'envisager dans le futur une production basée sur les biotechnologies.

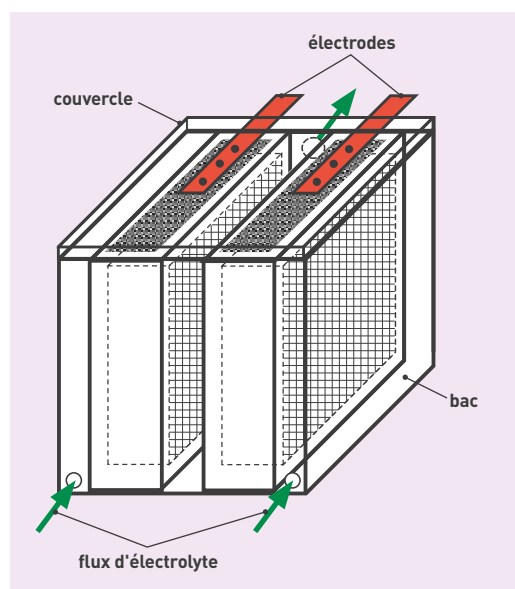


Figure 2. Schéma de la cellule à électrodes nid-d'abeilles traversantes. La géométrie de cette cellule permet d'optimiser le rapport volume/surface active, pour des canaux de diamètre 1-3 mm et de longueur 15-20 mm. La circulation d'électrolyte se fait en flux croisés, pour que les effets de la chute ohmique (résistance interne de la cellule, qui dépend de la nature de l'électrolyte, de la distance entre les électrodes...) soient compensés par le gradient de concentration de Pb^{2+} le long des canaux. La surface active élevée conduit à une cellule très compacte, qui pourra fournir une forte puissance avec un débit d'électrolyte faible durant la charge, limitant ainsi le risque de détachement de matière active.



Électrode traversante avant calcination (à droite, composite de **résine phénolique** et de **cellulose**) et après calcination (à gauche, carbone vitreux, matériau carboné de faible densité).



Prototypé de réacteur à électrodes nid-d'abeilles traversantes (à gauche) à partir duquel un prototype de batterie redox à circulation Pb-AMS a été construit (à droite). On distingue le réservoir d'électrolyte, la pompe (en blanc), le réacteur et les indicateurs de circulation d'électrolyte (en bleu et en noir).



Réacteur à circulation à électrodes nid-d'abeilles

Derek Pletcher et son équipe travaillent sur une architecture bipolaire, dans laquelle le collecteur de courant supporte l'électrode positive (**cathode**) dans une cellule et l'électrode négative (**anode**) dans la suivante, jouant à la fois le rôle d'interconnexion entre les cellules et celui de mur intercellulaire. Dans cette configuration bipolaire, le plomb (Pb) et le dioxyde de plomb (PbO_2) se déposent en couche mince à la surface des électrodes mais, au fur et à mesure du cyclage, des dépôts se forment à d'autres endroits du réacteur et génèrent des courts-circuits.

Optimiser la sécurité des batteries lithium

Mettre à disposition des **batteries** sécuritaires, c'est-à-dire présentant des garanties de sécurité, grâce à la compréhension des phénomènes mis en jeu lors de sollicitations externes agressives. Tel est l'un des objectifs poursuivi par le CEA pour optimiser les batteries lithium. Le programme Sécurité des batteries lithium permet ainsi de tester les technologies de batteries développées au CEA ou en collaboration avec des partenaires. Il concerne l'ensemble des applications industrielles faisant appel à une batterie (véhicule, solaire, électronique nomade...). Par exemple, le véhicule électrique, qui repose sur la R&D de nouvelles architectures et de nouvelles chimies de batteries en vue d'augmenter son autonomie tout en réduisant les coûts, fait l'objet de travaux visant à optimiser la sûreté des dispositifs employés.

Un objectif de sécurité

Tester la sécurité des batteries nécessite la conception, la réalisation et l'interprétation d'essais permettant de solliciter ce type d'élément en environnement accidentel poussé aux limites (essais abusifs). Ces essais, fortement instrumentés, requièrent des installations particulières, capables d'accueillir tous les formats d'objets à tester, de la pile bouton jusqu'au **pack batterie** complet de véhicule : laboratoires, ateliers,



Essai thermique : incendie par chauffage au chalumeau. Cette expérimentation consiste à aggraver thermiquement un accumulateur par chauffage au chalumeau, à observer son comportement au cours du temps et à tester les moyens usuels d'extinction (eau, CO_2 ...).

dalles et bancs d'essais nombreux car spécifiques à chaque échelle d'objet (compte tenu des spécifications demandées par les normes). Ils doivent en outre pouvoir être menés à distance, en toute sécurité pour le personnel et les installations.

L'activité Sécurité des batteries lithium est aujourd'hui basée sur des moyens et des compétences fortes du CEA en sciences des matériaux, en particulier énergétiques, en électrochimie, en instrumentation d'essais spécifiques et en caractérisations physico-chimiques. Ces compétences et moyens sont notamment disponibles au sein du Département des explosifs (DXPL) [Direction des applications militaires (DAM), centre CEA du Ripault] et du Département de l'électricité et de l'hydrogène pour les transports (DEHT) [Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux), Direction de la recherche technologique (DRT), centre CEA de Grenoble]. Il s'agit principalement d'analyser le comportement des différentes technologies et architectures lorsqu'elles sont soumises à des agressions thermiques

(surchauffe, incendie...), mécaniques (chute, choc, perforation...) et/ou électriques (court-circuit, surcharge, surdécharge, etc.). Il est également possible d'élaborer des tests spécifiques, à la demande de partenaires extérieurs. Ces essais s'appuient sur des projets de normes qui sont encore en discussion.

Une fois les essais aux limites effectués, les **accumulateurs**, modules et packs sont autopsiés afin de comprendre les phénomènes physico-chimiques mis en jeu. Un protocole d'analyse a été mis en place, du démontage du dispositif en toute sécurité à l'analyse proprement dite. Les expertises *post mortem* des matériaux et des architectures sont réalisées au DEHT (caractérisations électrochimiques, physico-chimiques...) et au DXPL (caractérisations mécaniques, dimensionnelles, des émanations gazeuses, radiographiques...). Une attention particulière est portée à la nature, à la quantité et à la cinétique des gaz, des fumées et des flammes qui peuvent être libérés après certaines sollicitations abusives. L'analyse des gaz, avec la démarche scientifique de compréhension associée, est un point crucial appelé à prendre de l'importance. Des moyens d'analyses spécifiques de cartographie de l'ensemble des molécules présentes lors d'un essai abusif sont développés afin d'évaluer les risques toxique et thermique.

L'objectif du programme conduit par le CEA n'est pas d'homologuer des objets industriels – cela est, par exemple, le rôle de l'**Ineris (Institut national de l'environnement industriel et des risques)** et relève de la responsabilité de l'industriel – mais d'étudier des prototypes en situation accidentelle ou accidentelle, afin d'une part, de comprendre scientifiquement les phénomènes électrochimiques et physico-chimiques mis en jeu lors de sollicitations agressives et, d'autre



Batteries lithium-ion développées à l'Institut Liten.

P. Avavian/CEA

Pour pallier ce problème, le réacteur à circulation développé au LSE est de configuration monopolaire, avec des électrodes traversantes en carbone de structure en nid-d'abeilles décrites dans un brevet du CEA. De nombreux prototypes d'électrode, obtenus par calcination d'une structure en résine, ont permis de démontrer la faisabilité du procédé.

Un prototype de réacteur a été réalisé par l'équipe du LSE d'après le schéma de principe proposé à la figure 2, puis assemblé dans un système. Les premiers essais de charge-décharge et les mesures de **spectroscopie d'impédance électrochimique** ont montré que les caractéristiques électriques du prototype de batterie

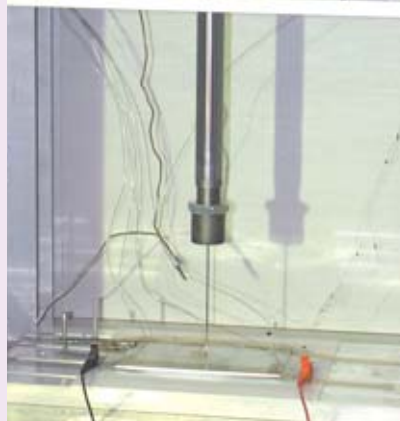
sont appropriées pour les applications solaires raccordées au réseau et stationnaires. Cependant, les performances du système sont encore limitées en raison de la géométrie non optimisée du réacteur et des besoins d'amélioration de la **stoechiométrie** de réaction.

> Marion Perrin

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)

Direction de la recherche technologique
CEA Grenoble (Site Ines)

part, d'optimiser les solutions technologiques en cours ou en fin de développement. Une fois les essais abusifs réalisés, l'optimisation passe notamment par la mise au point de nouveaux matériaux et par le *design* de *packagings* sécuritaires



Essai mécanique de perforation (test au clou). La perforation d'un accumulateur est réalisée avec une pointe métallique qui traverse de part en part l'élément. Cet essai simule un court-circuit interne de la batterie.

intelligents. Le Laboratoire des matériaux pour les batteries (LMB) du Liten met ainsi en œuvre de nouvelles chimies «sécuritaires» via la synthèse de nouvelles matières actives d'**électrodes** positive et négative et d'**électrolyte** sécuritaire, et le développement de séparateurs innovants. En partenariat avec l'Institut Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information), le Liten travaille également sur de nouvelles architectures électriques du pack batterie permettant de le reconfigurer dynamiquement.

Une plateforme pour tester les batteries

La DAM et la DRT œuvrent à la mise en place d'une plateforme de tests de sécurité pour batteries lithium afin d'améliorer les performances dans ce domaine. Cette plateforme, implantée sur le site du Ripault, est opérationnelle depuis janvier 2013. Il s'agit d'un bâtiment merlonné⁽¹⁾ de 300 m², composé de trois locaux indépendants qui permettront de tester les différentes gammes de puissance des batteries aux trois principaux types de sollicitations demandées : électriques, thermiques, mécaniques, ou combinés. Cette installation sécurisée possède un poste de commande déporté équipé de matériels d'enregistrement et de dispositifs de pilotage de matériels, de mesures et de vidéos.

À terme, le CEA sera en mesure de se positionner sur la garantie de sûreté des technologies lithium en déclinant la démarche simulation mise en œuvre pour les objets de la DAM. Par exemple, il n'existe pas de prévision de performances des matériaux et des architectures pour simuler ce que serait le comportement d'une batterie en



Essai électrique de court-circuit. Le court-circuit est provoqué en mettant en relation le pôle positif et le pôle négatif d'un accumulateur à l'aide d'un conducteur métallique de résistance négligeable. Cet essai simule un court-circuit externe.

environnement accidentel. L'approche est, pour l'instant, essentiellement expérimentale. Dans un avenir proche, il serait intéressant de proposer une démarche simulation permettant d'apporter une meilleure garantie de fiabilité, de sûreté et de fonctionnement basée sur une composante modélisation et une composante expérimentale. Cela nécessitera un renforcement de l'expertise *post mortem* des batteries et de la modélisation des phénomènes physiques afin de simuler le comportement prédictif de tels objets soumis à des environnements accidentels.

> David Descarsin¹ et Johann Lejosne²

¹Département des explosifs
Direction des applications militaires
CEA Centre du Ripault

²Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble

(1) Merlon : levée de terre placée à proximité du bâtiment pour atténuer, sur le voisinage, les effets de projections et d'incendies.



Avec la montée en puissance des énergies renouvelables appelées à prendre une place importante dans le mix énergétique, le vecteur hydrogène apparaît comme un outil « tampon » adapté pour compenser l'intermittence de sources d'énergie telles que le solaire et l'éolien. Les technologies de production propre et de stockage de l'hydrogène développées devenant de plus en plus matures, des premières expérimentations ont été lancées, avec notamment la plateforme MYRTE installée en Corse. Dans ce démonstrateur couplé au réseau, de l'hydrogène est fabriqué à partir d'électricité, stocké et reconverti en électricité selon les besoins, de façon à gérer les fluctuations de puissance de l'énergie photovoltaïque et, par conséquent, d'équilibrer l'offre et la demande. Cette expérimentation « grandeur nature » va permettre de tester différentes fonctions de stockage et de mettre au point des stratégies de gestion de l'énergie. **L'hydrogène constitue ainsi un vecteur énergétique alternatif pertinent susceptible de compléter efficacement le vecteur électricité. Plus qu'un simple vecteur, il peut aussi être utilisé comme moyen de stockage de l'énergie, ce qui donne une autre dimension à la filière hydrogène.**

L'hydrogène, un vecteur énergétique inépuisable

Le stockage de l'hydrogène

L'hydrogène, vecteur stockable de l'énergie, est envisagé pour deux types d'applications majeures : le stationnaire pour la valorisation des énergies renouvelables, et la fourniture d'énergie pour des systèmes embarqués. Le CEA développe différentes solutions de stockage de l'hydrogène, que ce soit sous sa forme gazeuse ou solide, répondant aux exigences de compacité, légèreté, sûreté et coûts. Si le stockage à basse pression et le stockage solide dans les hydrures semblent privilégiés pour le stationnaire, plusieurs technologies sont en concurrence pour les transports.

Réservoir de stockage de l'hydrogène dans un hydrure dit basse température TiFeMn. La désorption se fait grâce à la chaleur fournie par la pile à combustible. Ce réservoir a été développé par l'Institut Liten/DTBH pour une application agricole avec le groupe Massey Ferguson – AGCO. Un module comme celui présenté peut stocker 2 kg d'hydrogène en 30 minutes à seulement 30 bars. On atteint la même capacité volumique qu'un réservoir à 700 bars.



P. Avellan/CEA

Il existe aujourd'hui trois technologies principales de stockage de l'hydrogène pur. L'objectif est d'obtenir une bonne compacité du système de stockage. Dans les conditions normales de température et de pression (CSTP : 1 bar, 20 °C), l'hydrogène occupe un volume de 333 L/kWh, contre 0,1 L/kWh pour l'essence. Il est donc impératif de gagner en volume. Le premier moyen pour y parvenir est de *comprimer* le gaz. Cette technologie est préconisée pour l'automobile. À 700 bars, l'hydrogène occupe un volume de 0,47 L/kWh. Une autre manière de gagner en compacité est de le *liquéfier*, ce qui exige de le refroidir en-dessous de 20,3 K (-252,8 °C). À ce moment, l'hydrogène occupe un volume de 0,38 L/kWh. Enfin, le troisième mode de stockage dit « *stockage solide* » consiste à se servir d'un matériau qui *absorbe* l'hydrogène. Les atomes d'hydrogène qui pénètrent la maille cristalline d'un matériau « s'hydrurant » se trouvent plus proches que sous sa forme gazeuse ou même liquide. Par exemple, pour certains matériaux absorbant l'hydrogène, le volume occupé peut se réduire à 0,25 L/kWh dans les conditions normales. D'où l'intérêt de ce mode de stockage qui bénéficie d'une très bonne capacité volumique, avec cependant des capacités massiques faibles, puisque la masse du

matériau stockant l'hydrogène est nettement plus élevée que celle de l'hydrogène stocké (figure 1).

Le Département des technologies biomasse et hydrogène (DTBH) de l'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux) du CEA travaille sur deux types d'applications : stationnaire, pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables, et embarqué. Pour le stationnaire, un système très peu cher par rapport au kilogramme d'hydrogène stocké, avec un rendement énergétique⁽¹⁾ élevé, sera tout d'abord recherché. Les solutions actuelles s'orientent vers un stockage à basse pression ou vers un stockage mettant en œuvre des hydrures. Concernant les systèmes embarqués, les impératifs de volume et de poids sont prépondérants. Une cinétique de remplissage rapide sera également visée, la consommation étant généralement plus étalée dans le temps.

Le stockage en pression

Le stockage de l'hydrogène à l'état gazeux met en œuvre des réservoirs dits **hyperbares** classés en quatre catégories. Les « types I » sont entièrement métalliques, les « types II » sont métalliques avec un enroulement filamentaire (généralement en fibre de verre), les « types III » comportent un enroulement filamentaire complet et incluent un **liner** (revêtement interne servant de barrière à l'hydrogène) en métal. Les « types IV » contiennent, quant à eux, un **liner** en **polymère** (essentiellement **thermoplastique** de type polyéthylène ou polyamide). Les fibres utilisées pour les types III et IV sont des **fibres de carbone**. Cette évolution a été gouvernée par la recherche d'un allègement de la structure, la technologie de type I ne convenant pas pour l'application automobile. C'est par contre une solution qui est encore choisie pour le stockage stationnaire, spécialement à basse pression, afin de limiter le coût énergétique de compression du gaz qui peut atteindre 25 % dans le cas des réservoirs à 700 bars. Dans ce cas, la fibre de verre, moins coûteuse, est employée.

Actuellement, la seule solution qui se dégage pour la voiture est l'utilisation de réservoirs de type III ou IV à 350 bars en nominal, en se dirigeant vers 700 bars. Plusieurs dizaines de voitures à hydrogène roulent en ce moment aux États-Unis, où se développent des « autoroutes de l'hydrogène ». Des projets semblables voient le jour en Allemagne ou au Japon, où des stations-service sont déjà mises en fonctionnement. En France, la question réglementaire constitue encore un frein pour faire rouler des véhicules à hydrogène commerciaux sur la voie publique. Il faut espérer que le travail de normalisation entrepris, notamment par l'**Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible** (AFHYPAC) permettra de faire émerger rapidement les voitures à hydrogène en France.

Le stockage liquide

Plusieurs constructeurs automobiles se sont intéressés au stockage **cryogénique** de l'hydrogène sous forme liquide, cette technologie offrant aujourd'hui les meilleures performances en termes de masse et de volume. En contrepartie, la liquéfaction est très gourmande en énergie, laquelle correspond généralement à 30 % du **pouvoir calorifique inférieur** (PCI) de l'hydrogène stocké. Le constructeur automobile

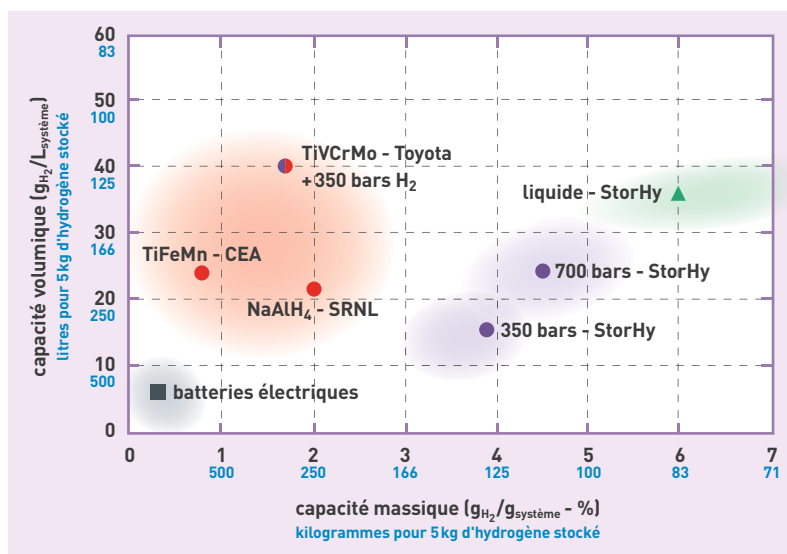


Figure 1.

Capacités massique et volumique de stockage pour les trois modes de stockage possibles dans une optique de transport automobile. La capacité de stockage en gramme d'hydrogène est rapportée au volume et à la masse du système complet de stockage. Il apparaît clairement que le stockage hydrure (en rouge), même s'il permet de générer les applications les moins volumineuses, dispose d'une capacité massique bien moindre que les deux autres modes de stockage : à l'état gazeux en pression (en violet) et sous forme liquide (en vert). À titre de comparaison, l'essence a un PCI de 42 700 kJ/kg et une densité de 0,75 kg/L donne un équivalent énergétique de 36 g_{H₂}/g_{système} et 270 g_{H₂}/L_{système}. Les données sur le stockage en pression et le stockage liquide sont issues des études réalisées dans le cadre du projet européen StorHy et celles sur l'hydrure NaAlH₄ proviennent des travaux menés au Savannah River National Laboratory (SRNL, États-Unis).

BMW a longtemps misé sur ce type de stockage pour l'automobile. Cependant, les problèmes de sécurité liés au phénomène de vaporisation et à la fragilité des réservoirs devraient avoir raison de ce mode de stockage pour cette application.

Le stockage solide

Le stockage solide met en œuvre des hydrures, le terme hydrure englobant une grande variété de matériaux. En règle générale, il est question d'hydrure lorsque se forme une liaison métal-hydrogène. Pour ces matériaux qui servent au stockage de l'hydrogène par absorption ou **adsorption**, de bonnes capacités de stockage réversibles⁽²⁾ dans des conditions proches des conditions normales de température et de pression sont recherchées. Les caractéristiques de cinétique, d'activation, de stabilité en cyclage (**absorption/désorption**) et de coût sont aussi très importantes. Ces matériaux se classent en plusieurs familles.

Les hydrures métalliques interstitiels

La première famille regroupe les hydrures métalliques et intermétalliques⁽³⁾ dans lesquels l'hydrogène se place en interstitiel entre les positions atomiques normales de la maille cristalline du matériau, ceci par

(1) Rendement énergétique : rapport entre l'énergie qui sera fournie par l'hydrogène et celle nécessaire à son stockage.

(2) Capacité de stockage réversible : elle correspond à la quantité maximale d'hydrogène que peut décharger (désorber) le matériau de stockage une fois qu'il a été chargé, c'est-à-dire que l'hydrogène a été absorbé. Elle s'exprime souvent en pourcentage massique.

(3) Intermétallique : composé métallique avec une cristallographie spécifique et formé par l'association de plusieurs atomes métalliques.



liaison métallique. Beaucoup ont la capacité d'absorber de l'hydrogène, certains plus que d'autres dans les conditions normales de température et de pression. Par exemple, les métaux **alcalins** ou **alcalino-terreux** (lithium Li, calcium Ca ou magnésium Mg), les **métaux de transition** des quatrième ou cinquième colonnes du tableau périodique des éléments (zirconium Zr, titane Ti), ou les **terres rares** métalliques (lanthane La, cérium Ce) créent des hydrures très stables dans les conditions normales. Ils sont symbolisés par un « A ». D'autres éléments, les « B », constituent des hydrures instables dans les conditions normales. Ils sont stables seulement sous des conditions de fortes pressions. Ce sont, par exemple, la plupart des métaux de transition (chrome Cr, cobalt Co, nickel Ni ou fer Fe). La combinaison des éléments A et B produit souvent des hydrures qui sont réversibles dans des conditions proches des normales. Le plus connu est LaNi_5 , qui se forme à une pression d'hydrogène de 1,8 bar à température ambiante (tableau).

Jusqu'à présent, aucun hydrure métallique connu ne combine une capacité réversible supérieure à 2,5 % massique dans les conditions proches des normales. Il faut noter que l'hybridation stockage en pression-hydrure semble une piste intéressante comme le montre le résultat obtenu sur un prototype développé par Toyota (figure 1). Cela permet d'améliorer à la fois les capacités volumique et massique, la disponibilité de l'hydrogène, même à basse température, et la cinétique de chargement. L'avantage en termes de sécurité est par contre amoindri.

Les hydrures complexes

Une deuxième famille regroupe les hydrures dits complexes, appelés aussi hydrures chimiques, pour lesquels l'hydrogène établit des **liaisons covalentes** ou **ioniques** avec les atomes métalliques du matériau de stockage. Dans cette famille se trouvent les hydrures à base d'éléments légers (lithium Li, bore B, sodium Na) qui sont à même de donner des hydrures dotés de meilleures capacités massiques. Le LiBH_4 , par exemple, a théoriquement une capacité massique de 18,5 %, mais les conditions extrêmes de

la désorption ($> 300^\circ\text{C}$ pour 1 bar) et de l'absorption ($> 680^\circ\text{C}$, > 150 bars) éliminent ce matériau pour le stockage réversible de l'hydrogène. Les alanates, qui résultent de la combinaison d'un anion complexe $[\text{AlH}_4]^-$ ou $[\text{BH}_4]^-$ avec un cation de la classe des alcalins ou alcalino-terreux (Li, Na, Mg, Ca) posent à peu près le même problème. Cependant, récemment, une **catalyse** adaptée a pu rendre l'alanate de sodium (NaAlH_4) régénérable dans les conditions proches des normales. NaAlH_4 est pour l'instant le seul hydrure complexe réversible dans des conditions raisonnables de température et de pression (tableau). Sa tenue au cyclage n'est pas très bonne, le matériau est sujet à des phénomènes de **démixtion**. Par ailleurs, sa grande pyrophoricité, c'est-à-dire sa facilité à s'enflammer spontanément à l'air ambiant, rend son utilisation délicate.

Une autre manière d'utiliser les hydrures est l'**hydrolyse**. En effet, lorsque du borohydrure de sodium (NaBH_4) est mis en contact avec de l'eau, et à condition de catalyser la réaction avec un catalyseur à base de Co ou de Ni (brevet CEA - FR 2 892 111), de l'hydrogène est libéré. Toutefois, cette réaction n'est malheureusement pas facilement réversible, la solution obtenue *in fine* devant être traitée dans un système externe pour revenir au borohydrure de sodium.

Les matériaux adsorbants

Le stockage de l'hydrogène peut aussi avoir lieu par physisorption, ou adsorption de l'hydrogène en surface des matériaux. Les **liaisons** créées, de type **van der Waals**, sont des liaisons faibles. L'avantage réside dans le fait que ce phénomène est facilement réversible. Cependant, l'adsorption n'est en mesure de se produire que pour une faible agitation de l'hydrogène, c'est-à-dire pour des basses températures ou des pressions élevées. Les meilleurs résultats sont acquis à la température de l'azote liquide (77 K , $-196,1^\circ\text{C}$). La capacité dépend très fortement de la **surface spécifique** développée dans le matériau. Les matériaux présentant des **nanos**structurations sont des candidats intéressants. Parmi eux, il faut citer les charbons actifs, les nanotubes de carbone, les zéolites et les MOF (*Metal Oxide Framework*), dont la structure est constituée d'oxydes métalliques reliés par des groupements organiques conduisant à la formation de tunnels de près de quelques nanomètres carrés de section. Jusqu'à aujourd'hui, certains de ces matériaux ont révélé de bonnes caractéristiques massiques de stockage, de l'ordre de 6 %, mais à basse température (77 K). À température ambiante, les meilleurs atteignent difficilement 1 % massique. Ces matériaux souffrent par ailleurs d'une faible capacité volumique.

Le stockage par hydrure : une machine thermodynamique

Le mécanisme d'hydruration, qui peut se résumer à une transition de phase entre une phase pauvre en hydrogène et une plus riche, est exothermique (dégagement de chaleur) dans le sens de l'absorption de l'hydrogène et endothermique (apport de chaleur nécessaire) dans le sens de la désorption de l'hydrogène. Pour une température donnée, la réaction a lieu à une pression constante, appelée pression d'équilibre. Pour une température de l'hydrure maintenue constante, si une pression d'hydrogène supérieure à

hydrure	capacité réversible (% massique)	pression de désorption à 25°C (bar)	température pour 1 bar ($^\circ\text{C}$)	activation	cinétique
MgH_2 (broyage)	5,6	$\sim 10^{-6}$	279	–	–
$\text{MgH}_2 + 5\% \text{ V}$ (co-broyage à billes)	4,9	$\sim 10^{-6}$	279	–	++
TiFe	1,65	4,1	–8	--	+
TiFeMn	1,65	2,6	2	+	+
LaNi_5	1,28	1,8	12	++	++
LaNi_5Sn	1,24	0,27	55	++	++
TiVCrMo	1,8	101	–76	+	+
NaAlH_4 (deux plateaux)	5,5	0,7 0,015	33 110	++	–

Tableau.

Quelques exemples d'hydrures métalliques interstitiels ou complexes dont les conditions d'absorption/désorption se situent autour des conditions normales de température et de pression.

la pression d'équilibre est appliquée, il y aura absorption. Si au contraire la pression est inférieure, il y aura désorption. Par ailleurs, si la température croît, la pression d'équilibre augmente.

La connaissance des pressions d'équilibre en fonction de la température est une donnée importante pour le choix d'un hydrure pour une application particulière (figure 2). Ces pressions sont comparées à une fenêtre de conditions proches des normales allant de 10°C à 80°C – température de couplage à une **pile à combustible** à membrane échangeuse de protons H^+ (*Proton Exchange Membrane PEM*) – et de 1 à 30 bars en pression. Par exemple, l'hydrure $LaNi_5$ passe bien dans cette fenêtre alors que l'hydrure de type $TiVCrMo$ passe au-dessus en pression. Ce dernier sera donc plutôt réservé à des applications de stockage hybride pression-hydrure, qui voient le jour actuellement. Un avantage de l'hybridation avec $TiVCrMo$ est la disponibilité de l'hydrogène même à basse température (2,5 bars à -30°C).

La simple existence des courbes d'équilibre dans un domaine proche des conditions normales de température et de pression ne suffit pas à en faire un bon matériau de stockage. Les aspects cinétiques de réaction sont aussi très importants. La réaction d'hydruration n'est pas instantanée, elle peut durer de quelques secondes à quelques heures.

La mise en œuvre des hydrures nécessite la maîtrise de deux phénomènes particulièrement contraignants. D'une part, la quantité d'énergie calorifique générée pendant la réaction n'est pas négligeable. Pour un hydrure de type $TiFe$, elle correspond à 12 % de l'énergie contenue dans l'hydrogène stocké. Pour charger rapidement une grande quantité d'hydrure, il faut évacuer la chaleur produite. Par exemple, pour remplir un réservoir de $TiFe$ avec 1 kg d'hydrogène en 15 minutes, une énergie de 3,9 kWh devra être évacuée en 15 minutes, soit une puissance thermique de 15,5 kW. D'autre part, un hydrure peut croître de



Trois réservoirs de stockage de l'hydrogène, de technologie McPhy Energy, en test à l'Institut Liten/DTBH. Ces réservoirs stockent l'hydrogène dans un hydrure de magnésium (MgH_2). Leur particularité réside dans le fait que la chaleur d'hydruration est stockée dans un matériau à changement de phase puis restituée lors de la désorption. Ils permettent chacun de stocker 5 kg d'hydrogène à la pression maximale de 10 bars.

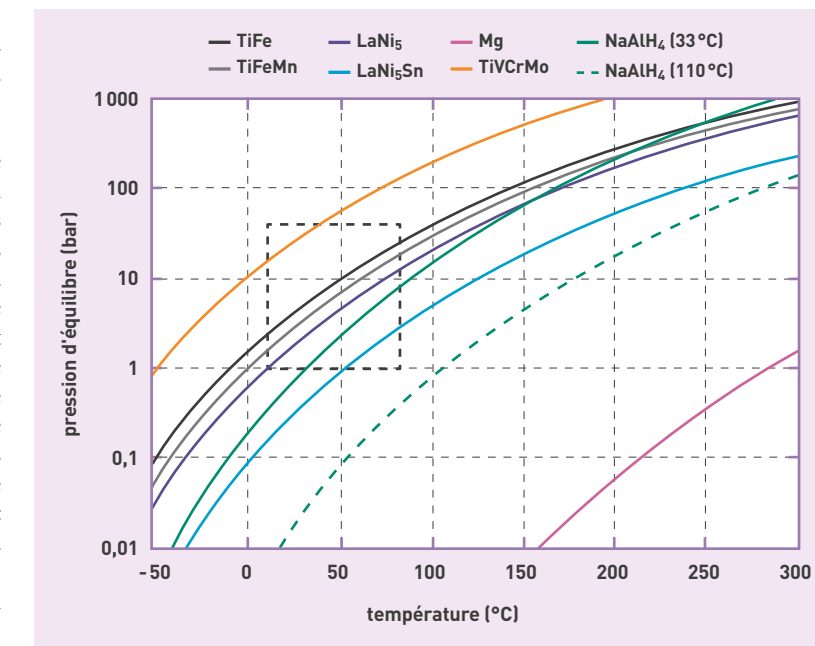


Figure 2. Comparaison des courbes d'équilibre des hydrures les plus intéressants pour le stockage de l'hydrogène autour des conditions normales de température et de pression.

10 à 30 % en volume lors de l'absorption d'hydrogène. Ce phénomène est susceptible de créer de très fortes contraintes dans le réservoir qui le contient, celles-ci augmentant au cours des cycles absorption/désorption de l'hydrogène.

Des réservoirs à hydrures

Pour le stationnaire, le DTBH travaille avec la société McPhy Energy sur l'hydrure de magnésium (MgH_2), un matériau séduisant du fait de sa capacité massique importante et de son abondance sur Terre. L'hydrogène est stocké dans un matériau MgH_2 nano-catalysé, ce qui améliore la cinétique de sorption, et compacté en pastilles avec du graphite, ce qui améliore aussi la cinétique en optimisant l'échange thermique. Le fonctionnement de l'hydrure de magnésium à plus de 300°C n'est pas gênant pour ce type d'application, en particulier s'il devient possible de stocker l'énergie d'hydruration. C'est ce qui est réalisé avec McPhy Energy qui développe des réservoirs dits **adiabatiques**. Ceux-ci conservent l'énergie d'hydruration dans des matériaux à changement de phase et la restituent lors de la désorption.

Concernant les applications embarquées, même si l'automobile reste pour l'instant hors de portée des hydrures existant actuellement, le DTBH met au point des réservoirs pour des applications dites lourdes, là où le poids n'est pas forcément rédhibitoire, comme les applications agricoles ou maritimes. Ainsi, un prototype de réservoir de 2 kg d'hydrogène a été conçu, réalisé et testé avec succès. Sa conception, optimisée sur le plan thermique notamment, a permis d'atteindre une cinétique de remplissage rapide, 80 % du réservoir étant rempli en 30 minutes, pour une cible initiale à 50 % en 30 minutes.

➤ **Olivier Gillia**

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble



L'hydrogène, moyen de stockage de l'électricité

La configuration actuelle du réseau électrique, en particulier insulaire, présente des limites à l'intégration de certaines sources d'énergies renouvelables telles que le photovoltaïque ou l'éolien. Parmi les nouvelles technologies de l'énergie, le stockage stationnaire de l'énergie électrique est identifié comme une des solutions pour pallier l'intermittence et le manque de prévisibilité des productions de ces énergies renouvelables. Il permet d'absorber les fluctuations et/ou les productions ne respectant pas les prévisions et ainsi d'accroître le taux de pénétration des énergies renouvelables sur le réseau sans risques de le déstabiliser.



Plateforme expérimentale MYRTE (Vignola près d'Ajaccio, Corse) qui met en œuvre le couplage de l'énergie solaire photovoltaïque avec une chaîne hydrogène comme vecteur énergétique pour le stockage des énergies renouvelables. Elle a pour objectif de développer un système et une stratégie de pilotage visant à améliorer la gestion et la stabilisation du réseau électrique corse. L'hydrogène, produit et stocké, permet de gérer les fluctuations de puissance des énergies renouvelables intermittentes intégrées dans le réseau.

L'étude de l'intégration des énergies renouvelables intermittentes associées à un moyen de stockage sur le réseau n'est pas une tâche aisée. En effet, l'architecture des systèmes électriques est de plus en plus complexe, en particulier quand l'intégration des vecteurs énergétiques de nature différente

(électricité, hydrogène, chaleur) est envisagée. Dans le but de comprendre les interactions de ces énergies renouvelables avec le reste du système électrique, un outil capable de simuler leur fonctionnement couplé à des solutions de stockage est développé dans le cadre d'une thèse en partie financée par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) au Département des technologies biomasse et hydrogène (DTBH) de l'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux) du CEA.

Le stockage d'énergie électrique, qu'il soit réalisé par l'usage de batteries ou via une chaîne hydrogène, permet de répondre à un large panel de besoins des différents acteurs du réseau électrique (optimisation économique, sûreté du système, qualité de service pour les clients finaux). L'étude d'un cas d'application répondant à l'appel d'offres de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) permet d'illustrer le travail accompli à ce jour. Il s'agit de la réalisation et de l'exploitation d'installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque d'une puissance supérieure à 250 kWc. On s'intéresse ici aux installations photovoltaïques concernant la Corse et les départements d'outre-mer. L'appel d'offres exige d'intégrer un dispositif de stockage de l'énergie produite. En effet, les réseaux électriques insulaires sont beaucoup moins robustes que le réseau électrique interconnecté européen et, par conséquent, sont beaucoup plus sensibles aux fortes variations de puissance injectée.

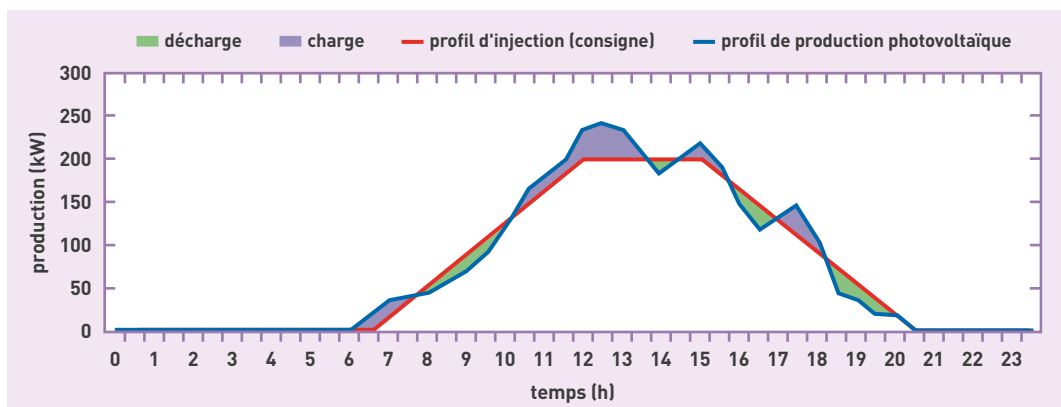


Figure 1.

La garantie de production, l'un des services que peut rendre le stockage à un acteur du réseau électrique. Charge : le système de stockage se remplit en utilisant l'électricité dont le réseau n'a pas besoin ; décharge : le système de stockage se vide et l'électricité est envoyée sur le réseau.

Trois architectures de stockage

Le système de stockage doit répondre à la fonction « garantie de production » (figure 1). Son rôle est de garantir, à chaque instant, que la production injectée sur le réseau est conforme au profil trapézoïdal annoncé la veille et obéissant à des critères précis de pente de montée/descente et à une production stationnaire inférieure à 40 % de la **puissance crête** des **modules photovoltaïques** installés. La garantie de production est ainsi associée à la notion de prévision de la production photovoltaïque dans l'optique de maîtriser l'injection de la production sur le réseau électrique.

Dans le cadre de ces travaux, une centrale photovoltaïque de 500 kWc a été retenue et trois systèmes de stockage différents sont étudiés et comparés. Le premier est constitué uniquement de batteries plomb-acide. Le second est une chaîne hydrogène qui comprend un **électrolyseur** à membrane échangeuse de protons H^+ (*Proton Exchange Membrane PEM*), un stockage d'hydrogène (H_2) et d'oxygène (O_2) sous pression, et une **pile à combustible** (PAC) PEM. Enfin, la troisième architecture est un hybride de ces deux technologies de stockage (figure 2).

Pour l'architecture à base de batteries, l'énergie produite excédentaire est stockée dans les batteries, puis restituée quand la production photovoltaïque devient inférieure à la prévision de fourniture. De même, pour l'architecture avec une chaîne hydrogène, l'énergie photovoltaïque en excès est stockée *via* l'électrolyseur, qui convertit l'électricité en hydrogène et en oxygène. Cette énergie est ensuite restituée par l'intermédiaire d'une pile à combustible, qui reconvertit l'hydrogène et l'oxygène en électricité sur le réseau pour compenser le déficit de production photovoltaïque et respecter ainsi la puissance d'injection telle qu'annoncée.

Les performances des deux technologies ont été évaluées sur la base de cinq indicateurs techniques :

- les taux de non-satisfaction de la charge en énergie et en temps correspondant au rapport entre la quantité d'énergie non fournie et la quantité d'énergie appelée – respectivement la fraction de temps pour laquelle l'énergie appelée n'a pas été complètement fournie ;
- les taux de non-utilisation en énergie et en temps de la source d'énergie renouvelable correspondant au rapport entre la quantité d'énergie non utilisée et l'énergie produite par le champ photovoltaïque – respectivement la fraction de temps pour laquelle l'énergie produite n'est pas employée entièrement ;
- l'efficacité énergétique des différentes architectures au travers d'un « rendement architecture » défini

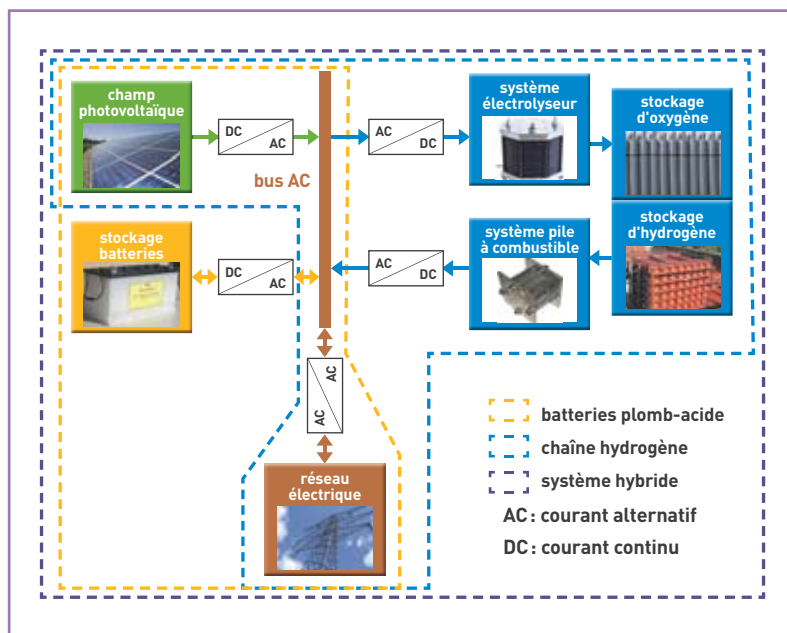


Figure 2.
Les architectures des systèmes de stockage étudiés.

comme le rapport entre l'énergie injectée sur le réseau et l'énergie photovoltaïque utilisée.

L'outil en cours de développement a été utilisé afin de déterminer les valeurs de ces indicateurs en fonction du dimensionnement des systèmes, c'est-à-dire le nombre de batteries et la taille du stockage de l'hydrogène.

Simuler et dimensionner les systèmes énergétiques

Les données d'entrée météorologiques (éclairage et température) utilisées sont celles de la station de Carpentras (Vaucluse). Elles ont été obtenues grâce au réseau *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN). L'étude porte sur un an de simulation (année 2003) à partir de données à la minute. Les principales étapes de la démarche de travail suivie comprennent la mise en forme des données, le calcul de la production photovoltaïque prévue, la création du profil de charge proposé pour le lendemain, pour aboutir au calcul des indicateurs précités. Les modèles représentant le fonctionnement des différentes briques technologiques mobilisées par un tel système sont issus de la littérature et/ou des caractéristiques techniques publiques fournies par les constructeurs.

Dans le cas de l'architecture de stockage à base de batteries uniquement, les résultats de la simulation établissent qu'un nombre de l'ordre de 1800 batteries, d'une **capacité** de 54 **A·h** chacune, sont nécessaires pour atteindre un taux de non-satisfaction nul, en temps comme en énergie (tableau). Concernant

système de stockage	énergie photovoltaïque utilisée (MWh)	taux de non-utilisation (%) en énergie en temps	énergie injectée (MWh)	taux de non-satisfaction (%) en énergie en temps	rendement architecture (%)
batteries seules (1800 batteries)	554	0,2 0,3	465	0,0 0,0	83,9
chaîne hydrogène seule (51 kg H_2)	551	0,7 7,5	365	1,1 8,3	66,2
hybridation batteries-chaîne hydrogène (200 batteries, 51 kg H_2)	552	0,2 0,3	367	0,0 0,0	66,4

Tableau.
Synthèse des performances des différentes architectures de stockage.



Plateforme expérimentale MYRTE (Corse) : la pile à combustible.

L'architecture de stockage avec une chaîne hydrogène seule, on prend pour hypothèse dans cette étude que l'électrolyseur est dimensionné sur la puissance photovoltaïque maximale (500 kW) et la pile à combustible est dimensionnée sur la puissance maximale injectable sur le réseau (40 % de la puissance photovoltaïque, soit 200 kW). Le seul degré de liberté pris en compte ici se situe au niveau de la masse d'hydrogène stocké. Sa valeur optimale est de 51 kg, soit un volume de réservoir de 21 m³ à 25°C et 30 bars. L'analyse du profil de charge non satisfait fait apparaître la non-satisfaction de la charge pour des puissances inférieures à 13 kW, correspondant au seuil de démarrage de la pile à combustible dans le cas étudié. En d'autres termes, la chaîne hydrogène, telle qu'elle a été dimensionnée et avec la stratégie de gestion utilisée pour ce cas d'étude, n'est pas capable de fournir les puissances les plus faibles. De même, les petites puissances ne peuvent pas être absorbées par le système électrolyseur, puisqu'en deçà de son seuil de démarrage. Par conséquent, les calculs effectués semblent montrer que des améliorations techniques doivent être mises en place (nouvelles architectures, hybridation hydrogène-batteries, optimisation de la stratégie de gestion de l'énergie) pour adapter la chaîne hydrogène aux conditions de l'appel d'offres. Il est en effet possible d'imaginer de scinder la pile à combustible et l'électrolyseur en sous-systèmes de puissances appropriées, de manière à minimiser cet inconvénient.

L'intérêt d'hybrider les deux systèmes de stockage apparaît nettement au regard de ces résultats. En effet, il est envisageable que les batteries soient utilisées pour traiter les puissances en dessous des seuils de démarrage de la chaîne hydrogène et que cette dernière assure le fonctionnement principal de l'installation. Avec une stratégie de gestion de l'énergie visant à maintenir le niveau des batteries chargé le plus souvent possible et en conservant la chaîne hydrogène identique au cas précédent (51 kg H₂), l'ajout de 200 batteries de 54 A·h est suffisant pour satisfaire 100 % du profil de charge.

L'outil ainsi développé est conçu pour effectuer un dimensionnement de systèmes de stockage pour un profil de production d'énergies renouvelables et un profil de charge donnés. Il permet de comparer plusieurs architectures intégrant une chaîne hydrogène et/ou des batteries plomb-acide d'un point de vue technique, ce qui a conduit à identifier l'intérêt du couplage de la chaîne hydrogène avec des batteries.

Prendre en compte des facteurs essentiels

La poursuite des travaux intégrera la dimension économique à ce cas d'étude. Les coûts d'investissement, de fonctionnement et de remplacement des composants seront estimés ainsi que les pénalités imposées par la CRE lorsque ses critères ne sont pas satisfaits. En effet, bien qu'un taux de non-satisfaction d'environ 1 % en énergie paraisse, *a priori*, acceptable (cas de la chaîne hydrogène seule), le taux de non-satisfaction en temps avoisine quant à lui 8 %, ce qui pourrait résulter en la non-rémunération d'une partie non négligeable de l'énergie injectée. La prise en compte de la dimension économique conduira à

statuer sur un compromis, pour chaque architecture, relatif au taux de non-satisfaction ne pénalisant pas les revenus de manière excessive.

Enfin, il est judicieux de mener ces études sur des durées d'exploitation de plusieurs années (généralement 20 à 25 ans). Dans ce cas, il devient indispensable de considérer les mécanismes de vieillissement afin, non seulement de déterminer le nombre de remplacements nécessaires des différents composants et les coûts associés, mais également de traduire ce vieillissement sur les performances des composants pour en étudier l'impact sur le dimensionnement global du système.

Projets et expérimentations

À travers l'étude qui vient d'être présentée, il apparaît clairement que la question du dimensionnement du stockage de l'électricité en couplage avec les énergies renouvelables n'est pas chose simple, et en particulier lorsqu'il est envisagé d'associer plusieurs technologies. La recherche d'un optimum dans le dimensionnement du système comme dans son exploitation fait l'objet de divers projets au DTBH.

L'un d'eux, le projet MYRTE (Mission hydrogène renouvelable pour l'intégration au réseau électrique), qui rassemble l'Université de Corse, la société HELION (filiale d'**Areva**) et le CEA, porte sur l'installation et l'exploitation d'une plateforme expérimentale à Vignola près d'Ajaccio (Corse). La plateforme, inaugurée en janvier 2012, est constituée d'une centrale photovoltaïque, d'une puissance installée de 560 kWc sur 3 700 m², reliée directement à un système de stockage de 3 920 Nm³ d'hydrogène. Diverses stratégies de gestion de l'énergie et différentes fonctions de stockage vont être testées par les partenaires, en accord avec **EDF-SEI** (Systèmes énergétiques insulaires) qui acceptera sur le réseau insulaire corse l'énergie ainsi réinjectée. Il s'agit notamment d'examiner la capacité du système à répondre à un objectif d'écrtage de la pointe appelée par le réseau électrique et au lissage de la puissance photovoltaïque produite, qui consiste à limiter les fluctuations et perturbations sur le réseau électrique. Quant au projet REVERSE (Réseaux électriques : évaluation de la valeur économique et environnementale du stockage de l'électricité par la simulation) financé par l'**ANR-Progelec** (Production renouvelable et gestion de l'électricité), qui a débuté en janvier 2012, son objectif est de développer une approche systémique d'évaluation de l'intérêt technique, économique et environnemental des technologies de stockage d'électricité dans les réseaux. Le projet est réalisé en partenariat avec **RTE (Réseau de transport d'électricité)**, HELION, le G2Elab (Laboratoire Grenoble génie électrique) et le LEPMI (Laboratoire d'électrochimie et de physicochimie des matériaux et des interfaces).

> **Benjamin Guinot, Florent Montignac et Isabelle Noirot**

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble

Smart grids : quand les réseaux électriques deviennent intelligents

Introduction croissante dans les réseaux des énergies renouvelables au caractère intermittent, multiplication des sites de production, développement de nouveaux usages comme le véhicule électrique... le système électrique est en pleine mutation. Pour y répondre, il doit s'adapter. **Avec les smart grids, ou réseaux électriques intelligents, qui intègrent des fonctionnalités issues des nouvelles technologies de l'information et de la communication, il sera possible de le piloter dans son ensemble, de la production à la consommation, en prenant en compte les actions de tous ses acteurs et leurs interactions.**

Le système électrique tel que nous le connaissons actuellement est d'une grande complexité. Il résulte en effet de l'addition successive d'éléments de technologies différentes et fait intervenir de nombreux acteurs : gestionnaires de réseau de transport (GRT), gestionnaires des réseaux de distribution (GRD), producteurs, fournisseurs, consommateurs, etc. Cette complexité est d'ailleurs à la source des difficultés que rencontrent les ingénieurs pour prévoir et limiter les pannes à grande échelle (encadré 1). En permanence, il faut assurer l'équilibre entre production et consommation, et la tension doit rester conforme à un certain niveau de qualité en tout point du territoire. La mutualisation de l'ensemble des moyens de production constitue le principal avantage offert par un réseau électrique. Elle aboutit à la réduction des aléas (en termes relatifs), des coûts, des temps de coupure... L'équilibre production-consommation, condition nécessaire à la stabilité du réseau, est de la responsabilité de RTE (Réseau de transport d'électricité). Il est assuré par des moyens de production de plusieurs dizaines ou centaines de MW thermiques et hydrauliques. L'état du réseau de transport et la production des grandes centrales sont suivis en temps réel dans les différents centres de conduite (*dispatching*) de RTE.

L'évolution du système électrique

Les choses sont aujourd'hui en train de changer sur bien des aspects, tant au niveau de la consommation qu'à celui de la production.

La consommation

La tendance actuelle est à une croissance relativement faible de la demande énergétique annuelle. On observe cependant une forte augmentation de la pointe, avec un record une nouvelle fois battu durant l'hiver 2011 : une pointe à 101,7 GW contre à peine 80 GW il y a dix ans. Or, c'est cette consommation d'électricité à la pointe qui régit le dimensionnement du système électrique. Il faut être en mesure d'y répondre, même si elle ne dure que peu de temps, et les réseaux doivent être capables de transporter ces flux de puissance. Une autre difficulté se profile avec l'arrivée du véhicule électrique. Lorsqu'il y en aura plusieurs millions en



Guillaume Zulli/RTE

France, et si rien n'est fait pour piloter leur recharge, nous assisterons à un nouveau renforcement de la pointe à hauteur de quelques GW supplémentaires, avec de surcroît des risques locaux de congestion. Enfin, le réchauffement climatique et la généralisation de la climatisation font aussi apparaître une pointe en été, qui posera de sérieux problèmes en région PACA (Provence-Alpes-Côte d'Azur).

La production

Jusqu'à présent, elle était réalisée par des groupes de production électrique⁽¹⁾ de taille importante (économie d'échelle), contrôlables et dont l'état est connu en permanence. Il s'agit d'une production centralisée. Un mouvement de fond est en cours : le développement d'une production décentralisée et renouvelable. Fin 2012, elle représentait déjà en France plus de 10% de la puissance installée. Et ce n'est qu'un début ! L'avenir électrique sera « renouvelable » à un horizon de quelques dizaines d'années, pour des raisons économiques, de ressources et environnementales. Ces énergies renouvelables étant produites majoritairement au fil de l'eau (du soleil, du vent), l'équation production = consommation devra se lire à l'envers.

Ligne aérienne très haute tension, qui transporte l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs. Face à l'évolution en cours du réseau électrique et dans un souci d'efficacité énergétique, l'intégration de technologies intelligentes telles que les smart grids devient indispensable. Ils permettront d'adapter en temps réel l'offre et la demande d'électricité.

(1) Les groupes de production électrique sont constitués de génératrices électriques et de leurs auxiliaires. Il y en a souvent plusieurs par centrale.



Energy Pool

Pilotage de la centrale de modulation de 1000 MW de capacité située à Chambéry (Savoie) de la société Energy Pool. La modulation de la consommation s'appuie sur les nouvelles technologies de l'information et de la communication mises en œuvre dans les smart grids pour optimiser la production, la distribution, la consommation d'électricité et l'ajustement entre l'offre et la demande.

Un nouveau paradigme

Petit à petit, la logique du client-roi sera abandonnée et l'on va passer d'une production qui s'adapte à la consommation à une consommation plus flexible, qui suivra l'évolution de la production. Les prémisses de cette transformation se matérialisent dès aujourd'hui à travers l'activité d'Energy Pool⁽²⁾. Cette société, basée en région Rhône-Alpes, « agrège des gros consommateurs pour valoriser leur capacité à moduler leur consommation à des heures critiques pour le réseau électrique »⁽³⁾. Elle pilote une centrale de modulation de 1000 MW de capacité, composante essentielle d'un réseau électrique intelligent. L'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux), à travers le Département des

technologies solaires situé à l'Ines (Institut national de l'énergie solaire), mène ainsi, avec Energy Pool et Schneider Electric, un programme de démonstration dont l'objet est le pilotage de 500 MW de consommation pour compenser l'intermittence de 100 MW de production renouvelable, solaire et éolienne.

Ce pilotage de la consommation, qui s'applique à des unités d'au moins 1 MW, va ensuite se généraliser et descendre à des niveaux de puissance de quelques centaines puis de quelques dizaines de kW. Il deviendra à terme rentable même chez le particulier, où il sera possible de jouer sur la flexibilité apportée par des charges de l'ordre du kW, les principaux gisements de flexibilité se trouvant là où de l'énergie est stockée : chauffage/climatisation des bâtiments (stockage thermique), recharge des véhicules électriques (stockage électrochimique), eau chaude sanitaire⁽⁴⁾.

Flux d'énergie et d'informations : les réseaux couplés

La maîtrise des flux d'énergie n'est possible que si, en parallèle, sont déployés les moyens de contrôle et de communication *ad hoc*. Il est en effet nécessaire de mesurer, communiquer et/ou agir en chacun des points de production ou de consommation afin de contrôler l'ensemble le mieux possible. Des réseaux de communication vont ainsi se superposer aux réseaux d'énergie. Les flux d'informations irrigueront et interconnecteront les réseaux électriques et, ce qui existe déjà au niveau du réseau de transport de l'électricité se généralisera dans les réseaux de distribution, puis dans les réseaux privés (bâtiments). L'état du système électrique sera connu en temps réel et de plus en plus finement. Ses intervenants (GRT, GRD, responsables

La stabilité des réseaux

1

Le réseau électrique résulte de l'addition au fil du temps de matériels et de technologies diverses, avec un grand nombre d'acteurs agissant à différents niveaux. Ceci forme un système complexe, susceptible de posséder des propriétés surprenantes et difficiles à prévoir pour les ingénieurs. Le réseau peut ainsi avoir

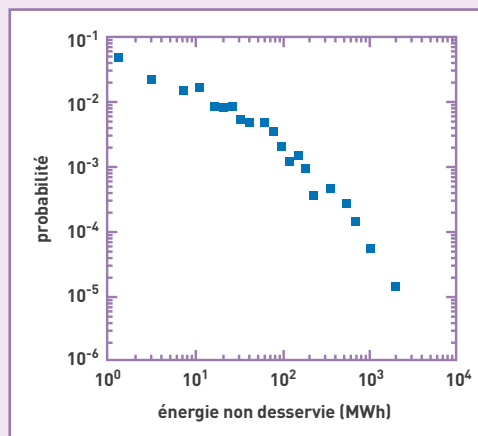


Figure. Distribution de probabilité d'énergie non desservie obtenue à partir des données des blackouts aux États-Unis entre 1984 et 1998⁽¹⁾.

une réponse disproportionnée « macroscopique », face à une perturbation locale « microscopique ». Des chercheurs américains⁽¹⁾ ont notamment montré que la distribution de la probabilité d'avoir un *blackout* d'une certaine taille, mesurée en MWh non desservis, décroît très lentement (figure). Autrement dit, la taille des *blackouts* n'est pas distribuée selon une loi gaussienne (courbe en cloche) mais présente des fluctuations très importantes, avec des variations sur presque 4 ordres de grandeur. Ce comportement, typique de systèmes constitués par de nombreux éléments en interaction, n'est pas encore maîtrisé dans le cas des réseaux électriques. Ainsi, il n'existe pas, à ce jour, de modèle suffisamment simple et réaliste permettant de reproduire la statistique des pannes et la réponse à une perturbation. De plus, avec l'avènement de productions d'électricité locales, le plus souvent de nature intermittente, de nouveaux problèmes apparaissent. En particulier, l'intermittence d'une production locale menace aussi la stabilité du réseau. On ne connaît pas à l'heure actuelle les conditions précises de stabilité et il s'agit là d'un domaine actif d'études théoriques.

(1) Ian DOBSON, Benjamin A. CARRERAS, Vickie E. LYNCH, and David E. NEWMAN, "Complex systems analysis of series of blackouts: Cascading failure, critical points, and self-organization", *Chaos* 17, 2007, 026103.

Pour le gestionnaire de réseau, en charge de l'équilibre production-consommation à chaque instant, l'aléa et la fluctuation non prévue d'un moyen de production posent problème car ils nécessitent de disposer de moyens de substitution capables de les compenser. L'intégration massive

d'électricité d'origine solaire ou éolienne dans des réseaux de faibles dimensions, par exemple les réseaux insulaires de Mayotte, de la Martinique ou de la Guadeloupe, peut donc s'avérer délicate et générer des surcoûts. Plusieurs solutions permettraient de réduire ces fluctuations :

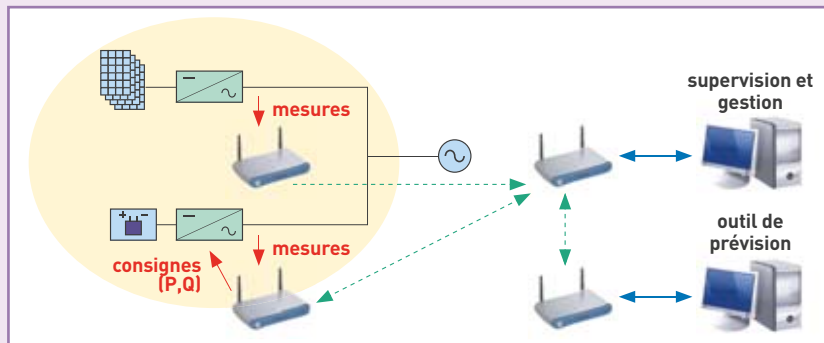


Figure. Stockage de l'énergie photovoltaïque et prévision de la production. Vu du réseau, ce système est comparable à n'importe quelle centrale électrique, avec un plan de production défini à l'avance et une participation aux services systèmes. P et Q sont des consignes en puissance. P : puissance active ; Q : puissance réactive.

- des prévisions de la production à différents horizons temporels (de quelques minutes à quelques jours) les plus précises possible ;
 - des moyens de stockage de l'énergie ;
 - une flexibilité et un contrôle d'une partie de la consommation en phase avec la production. L'ajout à une centrale ou à un groupe de centrales photovoltaïques d'un moyen de stockage intelligemment piloté semble être une solution réaliste pour atteindre un mode de fonctionnement et des caractéristiques qui, vis-à-vis du gestionnaire de réseau, se rapprochent de ceux d'une centrale classique :
 - plan de production défini la veille pour le lendemain ;
 - suivi du plan de production ;
 - participation aux services systèmes pour aider les gestionnaires de réseau à assurer la stabilité en tension et en fréquence ;
 - variations rapides de production limitées à une certaine plage de valeur.
- On aboutit ainsi au concept de production photovoltaïque garantie ou de centrale solaire régulée (figure).

d'équilibre production-consommation, agrégateurs...) anticiperont son évolution avec un minimum d'erreur et la gestion de l'ensemble se rapprochera de l'optimum. Diverses stratégies sont imaginées quant à la répartition de l'intelligence, au niveau d'agrégation et à la hiérarchisation entre les couches. Certains prônent le Web de l'énergie, d'autres se prononcent pour une organisation pyramidale ou des systèmes multi-agents locaux. Une grande variété de solutions est envisageable. Cette superposition de réseaux, observable à plusieurs échelles dans notre société, ne va cependant pas sans poser problèmes. En effet, des études théoriques récentes montrent que le couplage entre deux réseaux est à même, outre leur fragilité intrinsèque, d'induire de nouvelles failles. Ce résultat surprenant s'explique en terme de cascade de pannes : une panne locale d'électricité est en mesure de provoquer une panne du réseau de communication, susceptible d'entraîner à son tour un dysfonctionnement à un autre endroit du réseau et ainsi de suite. De nombreux exemples peuvent être

cités. Le plus parlant est celui de l'Italie où, après le *blackout*⁽⁵⁾ de 2003, l'opérateur national a eu toutes les peines du monde à rétablir le courant car le réseau de télécommunication avait cessé de fonctionner. Il devient donc crucial d'établir dans quelle mesure ce résultat peut se généraliser et dans quelles conditions précises le couplage entre réseaux a un effet déstabilisateur. Ce problème, qui se pose pour de nombreux réseaux de distribution et de transport, dépasse le cadre purement électrique.

Les premières applications

En attendant l'avènement des réseaux intelligents, des centres de R&D et des entreprises mettent au point des briques technologiques et des solutions partielles. C'est le cas du pilotage de la recharge de véhicules électriques, notamment par le photovoltaïque, du bâtiment intelligent, qui favorisera l'efficacité énergétique et l'auto-consommation de la production locale, de l'utilisation du stockage pour apporter des services aux réseaux, résoudre des congestions ou assurer une production renouvelable garantie (encadré 2). Sur chacune de ces applications, des tests et démonstrations à une échelle de quelques dizaines de kW à quelques MW commencent à voir le jour.

➤ **Marc Barthélémy¹ et Xavier Le Pivert²**

¹Institut de physique théorique (iPhT)
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay

²Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Grenoble (Site Ines)

(2) <http://www.energy-pool.eu/>.

(3) C'est le *Demand/Response* ou modulation de la consommation électrique en fonction des conditions du réseau. Cette gestion de la consommation d'électricité permet un ajustement entre l'offre et la demande. Pour ajuster rapidement et efficacement l'offre et la demande, l'agrégateur, qui pilote un nombre important de sites afin de bénéficier d'une large flexibilité, doit agir conjointement sur la production et sur un grand volume d'effacement potentiel, des délestages partiels par exemple, tout en garantissant un impact limité.

(4) C'est par exemple ce que propose la société française Voltalis avec le boîtier communicant BluePod. Installé sur le circuit électrique d'une habitation ou d'un bureau, il permet de moduler au cours du temps la consommation de certains équipements électriques (radiateurs, ballons d'eau chaude, climatiseurs...).

(5) *Blackout* : coupure d'électricité à grande échelle.



III. POUR UNE MEILLEURE UTILISATION DE L'ÉNERGIE

La mobilisation grandissante d'énergie par être humain est historiquement corrélée au développement de nos civilisations et à la croissance du PIB. La quantité d'énergie n'est pas pour autant le seul facteur intervenant dans la satisfaction des besoins de l'être humain.

À ce stade et sur la base de l'emploi majoritaire d'énergie fossile, la consommation actuelle d'un occidental est incompatible avec les ressources que la planète est en mesure de fournir de façon durable. La ressource en énergie renouvelable, et surtout en énergie solaire, est potentiellement très élevée, mais difficilement mobilisable partout au plus près des points d'utilisation et à un coût très bas. Le faible coût de l'énergie a jusqu'alors orienté vers des solutions qui ne seront plus adaptées à un monde dans lequel l'énergie sera plus chère.

Or, certains usages (transport, habitat) peuvent se faire dans le même confort, avec des consommations énergétiques très différenciées selon les modalités auxquelles on a recours. Il y a donc un champ d'investigation prioritaire autour de la sobriété énergétique. Nous sommes toujours frappés à l'Institut national de l'énergie solaire de voir, quand nous sommes confrontés à la nécessité de concevoir un système photovoltaïque autonome, combien il est possible de gagner en consommation d'énergie pour assurer les mêmes fonctions par rapport à un système équivalent élaboré au départ pour être raccordé au réseau. C'est un signe tout à fait encourageant montrant que la diminution de la consommation énergétique est réalisable avec un effort d'imagination et d'ingénierie. Le bâtiment est également un exemple saisissant des opportunités de réduction de la consommation énergétique, allant de pair avec une amélioration du confort des occupants. Les solutions techniques d'isolation existent. Il s'agit essentiellement d'un choix de priorité d'investissement. Cette transformation des bâtiments est aussi le meilleur moyen de créer de l'emploi local et de la valeur dans nos sociétés occidentales. Ce chapitre présente plusieurs études menées par le CEA, qui toutes visent cet objectif de meilleure efficacité énergétique. D'une large diversité, qui souligne la richesse de notre tissu de recherche, allant du plus amont au plus aval, elles couvrent les grandes applications que sont le transport, le bâtiment, la production industrielle, l'eau. Elles montrent que notre organisme est fortement impliqué dans cet enjeu fondamental et est capable d'offrir rapidement des solutions techniques exploitables à l'échelle industrielle. Il est d'ailleurs frappant de constater que ces études s'appuient sur la façon d'utiliser au mieux et plus efficacement trois ressources énergétiques : le nucléaire, le solaire et la biomasse. Pour le nucléaire, il s'agit notamment de valoriser la chaleur rejetée dans l'environnement par les centrales. Pour le solaire, une gestion intelligente de l'énergie conduit, par exemple, à tirer profit de l'électricité photovoltaïque produite dans l'habitat, pour recharger des véhicules électriques. En matière de biomasse, l'une des clés du succès passe par la capacité de tirer au mieux parti de l'aptitude des enzymes à activer les réactions biochimiques, à un coût énergétique minimal et quasiment sans générer de déchets.

Autant de preuves de l'engagement du CEA dans la diversification énergétique, preuves aussi de la nécessité de mobiliser toutes les opportunités pour atteindre sobriété et efficacité énergétiques.

➤ **Jean-Pierre Joly**

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Grenoble (Site Ines)



La mobilité solaire

Principaux consommateurs d'énergies fossiles en France et à l'origine de plus de la moitié des émissions de gaz à effet de serre, le transport et le bâtiment sont des cibles privilégiées pour le développement des énergies renouvelables, des technologies de l'énergie et de l'efficacité énergétique. Pour atteindre les objectifs fixés par le plan européen sur le climat et le Grenelle de l'environnement, **faire converger l'énergie solaire photovoltaïque, l'habitat et le transport – via la recharge de véhicules électriques ou hybrides – est l'une des solutions qui vont dans le sens d'une gestion intelligente de l'énergie.**



Parking solaire sur le site de l'Ines à Chambéry (Savoie). L'ombrière en bois est recouverte de panneaux photovoltaïques. Elle abrite 12 places de parking, soit une surface de 150 m². La station est équipée de 12 bornes de recharge.

La mobilité solaire est née en 2007, au CEA, sur le site de l'**Ines (Institut national de l'énergie solaire)**. Son ambition : valoriser au niveau local l'électricité produite par un système **photovoltaïque**

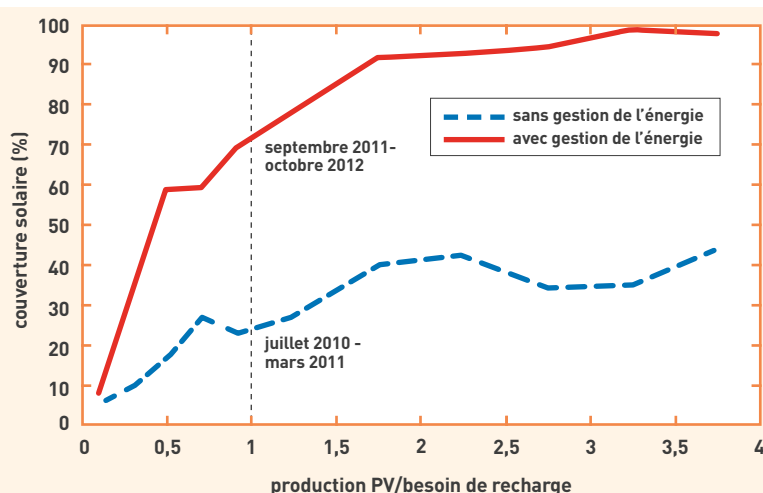


Figure 1. Apport de la gestion de l'énergie à la couverture solaire. Comparaison entre une période sans gestion, de juillet 2010 à mars 2011, et une période avec gestion, de septembre 2011 à octobre 2012. Par exemple, dans le cas où le rapport sur une journée est égal à 1 (soit autant d'énergie PV que de besoin en recharge), sans gestion, la couverture solaire est de 25%, alors qu'elle est de 73% avec gestion.

(PV), directement pour recharger les véhicules électriques ou alimenter les équipements électriques de l'habitat. Il s'agissait de se projeter dans un contexte futur, mais proche, sans tarif d'achat, ni crédit d'impôt pour le photovoltaïque.

Aujourd'hui, aucune incitation économique ne pousse le producteur/consommateur à auto-consommer localement sa production photovoltaïque. Chacun produit en permanence au fil du soleil et consomme quand il le souhaite. C'est une aberration sur le plan énergétique et un problème potentiel pour le réseau de distribution d'**ERDF (Électricité réseau distribution France)** au niveau électrique. Les objectifs de la R&D visent ainsi à limiter les impacts combinés du PV et du véhicule électrique sur le réseau et à maximiser l'efficacité énergétique de l'ensemble.

Quelques calculs simples suffisent pour se convaincre de la faisabilité de ces objectifs. Ils montrent qu'en 2020, 5 à 10 **TWh** seront fournis annuellement par des systèmes PV sur le réseau (soit une puissance installée entre 5 et 10 **GWc**) et qu'une puissance équivalente sera consommée par les 2 à 4 millions de véhicules électriques qui seront alors en service, à raison de 12 000 km/an et de 200 **Wh/km**.

Plus localement, une place de parking de 12 m² recouverte de **panneaux solaires photovoltaïques** peut générer l'équivalent de 12 000 km/an, en fonction du lieu géographique et de la période de l'année. Or, la distance nationale moyenne des trajets allers simples domicile-travail est de 25 km, la moitié des travailleurs parcourant moins de 8 km. La première application s'est donc tout logiquement focalisée sur une recharge sur le lieu de travail, là où le véhicule est stationné dans la journée, pendant la présence de la ressource solaire.

Des parkings photovoltaïques

Un projet de démonstration de parkings solaires, cofinancé par l'**Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe)**, Toyota et le CEA, est en cours sur les sites du CEA à Grenoble et à l'Ines. Dix **véhicules hybrides rechargeables** y sont rechargés sous des ombrières PV et le plein de la **batterie** est garanti aux utilisateurs. Les enjeux scientifiques de ce projet sont clairs. Il s'agit d'une part, de minimiser l'impact de l'application sur le réseau de distribution et d'éviter les pics de consommation, notamment le matin à 8 heures lors de l'arrivée des employés, et,

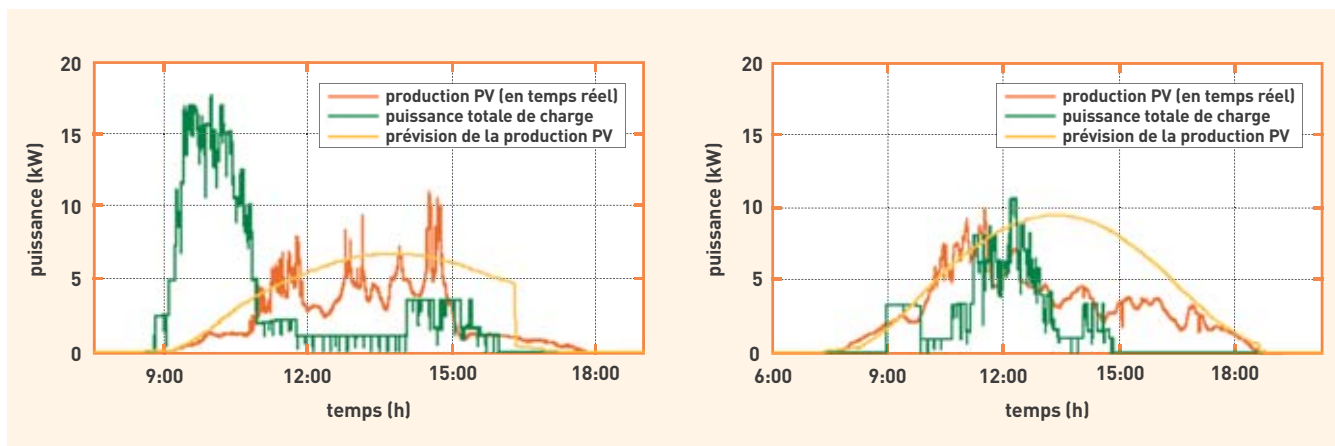


Figure 2.
À gauche, courbe de production et de consommation sans gestion de l'énergie (couverture solaire de 27%) pour la journée du 24 novembre 2010.
À droite, courbe de production et de consommation avec gestion de l'énergie (couverture solaire de 74,5%) pour la journée du 15 mars 2011.

d'autre part, de maximiser la quantité d'électricité produite par le PV directement dans les véhicules, en prenant en considération la couverture solaire, c'est-à-dire la part des besoins en énergie des véhicules couverts par l'installation PV.

D'autres applications de parkings solaires sont développées. Elles concernent l'auto-partage en ville, où les véhicules sont mutualisés entre plusieurs utilisateurs, et les véhicules de location pour la Corse en période estivale, ce qui présente un très grand intérêt vu la capacité limitée du réseau et le besoin en énergie fortement carbonée. Sont également à l'étude des parkings pour des véhicules légers destinés aux visiteurs d'un grand site industriel ou d'un site touristique ainsi que des emplacements pour des vélos à assistance électrique.

Gérer l'énergie localement

La gestion de l'énergie est au cœur des axes de R&D du CEA. La couverture solaire des parkings développés pour les véhicules Toyota a ainsi été sensiblement améliorée grâce à une gestion intelligente tenant compte de l'heure de départ des usagers, de la prévision d'éclairement solaire et de l'état de charge des batteries. Cette gestion est d'autant plus optimisée que la couverture solaire est élevée (figures 1 et 2). Un second aspect concerne la gestion électrique d'un véhicule bidirectionnel en courant, c'est-à-dire capable de donner de l'électricité au réseau pendant les pics de consommation et de se recharger pendant les heures creuses. Un démonstrateur sera effectif début 2013, en partenariat avec Renault, pour illustrer la faisabilité technique du couplage d'un système PV avec un véhicule électrique fournisseur d'énergie. Dans le futur, une telle utilisation permettra de mutualiser les fonctionnalités du stockage embarqué et d'offrir des services au réseau, par exemple la participation au plan de tension⁽¹⁾ ou à la réduction des pics de consommation. Outre la recherche d'une gestion optimale, tout un travail vise à quantifier et à minimiser le vieillissement supplémentaire qui pourrait être occasionné à la batterie lors de la fourniture de courant au réseau.

Des pistes pour demain

Si la mobilité solaire apparaît prioritairement comme une problématique de gestion d'énergie locale, d'autres pistes de recherche sont étudiées.

Le diagnostic à l'arrêt et sans intervention intrusive sur le véhicule est une fonctionnalité à grande valeur ajoutée. Elle permet à un exploitant de flotte d'anticiper la maintenance et, par voie de conséquence, de diminuer les coûts d'exploitation. Plusieurs solutions de reconnaissance de signatures électriques ont déjà été développées à l'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux).

Un autre axe de recherche porte sur la conception d'un dispositif d'électronique de puissance autorisant le maintien de l'équilibre des phases de l'infrastructure électrique en temps réel. En effet, les puissances de recharges des véhicules peuvent atteindre 7 kW en courant monophasé et créer de forts déséquilibres sur le réseau. Ces derniers sont sources de pertes et de surdimensionnement de l'installation électrotechnique.

Enfin, dans un tout autre registre, des travaux exploratoires ont été initiés sur la manière de « solariser » les routes en intégrant dans la chaussée des panneaux solaires qui alimenteront peut-être demain nos moyens de transport électriques.

La mobilité solaire illustre une des plus grandes qualités de l'électricité photovoltaïque, à savoir sa délocalisation au plus près de la consommation (encore faut-il gérer intelligemment l'énergie). À l'évidence le PV est le seul système permettant un rapprochement si étroit et donc une limitation des pertes électriques par transport. Un avantage non négligeable puisque ces pertes, dues à l'effet Joule, représentent en moyenne 6 à 8 % de l'électricité générée en France, soit l'équivalent de la production de deux tranches d'une centrale nucléaire.

> Franck Barruel

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Grenoble (Site Ines)

(1) Plan de tension : la tension électrique du réseau est régulée pour être constante dans une fourchette de ± 10 %.



Chimie verte, biocatalyse et biomimétisme

Dès leurs débuts, les industries chimique, pharmaceutique ou agro-alimentaire se sont orientées vers l'utilisation d'enzymes pour mettre au point des procédés de production efficaces. Ces dernières catalysent des réactions chimiques avec un coût énergétique minimal tout en ne générant que peu de déchets. Les performances, à ce jour inégalées, de ces biomolécules sont cependant liées à des conditions de milieu, de température et de pression restreintes, qui limitent leur emploi dans l'industrie. **Avec l'essor de la chimie verte, de nouveaux procédés, concernant aussi bien l'amélioration des performances des réactions enzymatiques par des méthodes biotechnologiques que la conception d'enzymes artificielles inspirées par leurs homologues naturelles, pour la production de bioénergie par exemple, sont en plein développement.**



C. Dupont/CEA

À gauche, automates de culture continue permettant d'accélérer l'évolution de souches microbiennes ou d'enzymes *in vivo* pour des utilisations biotechnologiques. À droite, photoproduction bio-inspirée d'hydrogène. L'hydrogène est produit à partir de l'eau sous l'action d'un photocatalyseur inorganique inspiré du fonctionnement des hydrogénases lors de la photosynthèse.



P. Avellan/CEA

Les apports de la chimie sont incontestables dans tous les domaines : alimentation, matériaux de la vie quotidienne, habillement, céramiques, colorants ou matières plastiques, santé ou énergie. L'industrialisation lui a permis de couvrir de nombreux besoins de la société mais, du fait de ce caractère industriel, les procédés et les productions sont à l'origine de pollutions et contribuent à l'épuisement de ressources limitées. Le développement de nouveaux procédés, dits de chimie verte, a été promu pour réduire les effets indésirables de l'industrie chimique. Cette chimie s'appuie notamment sur la **catalyse**, une technologie-clé qui rend possible la réalisation de réactions chimiques à un coût énergétique moins élevé et avec une meilleure sélectivité, tout en conduisant à une diminution importante de la quantité de déchets générés (solvants, produits secondaires non valorisables).

Les propriétés des catalyseurs

Un **catalyseur** est une petite molécule, une macromolécule ou un matériau solide qui interagit, de manière transitoire et hautement sélective, avec une ou plusieurs des espèces chimiques d'une réaction en abaissant l'énergie d'activation de cette dernière. Il permet d'orienter la réaction vers un produit majoritaire avec de bons rendements, dans des conditions relativement douces. En outre, à l'issue de la réaction, le catalyseur retrouve son état initial, si bien qu'il peut contribuer successivement à la transformation d'un grand nombre (idéalement une infinité) de molécules. Une très faible quantité de catalyseur est ainsi nécessaire.

Ceci explique que l'industrie chimique ait cherché de manière constante durant ces cinquante dernières années à introduire la catalyse dans les procédés de synthèse mis en œuvre. La recherche de nouveaux catalyseurs, toujours plus sélectifs et robustes, est l'une des approches les plus développées en chimie industrielle et, de fait, 80 % des produits manufacturés résultent d'une étape effectuée *via* un processus catalytique. Mais où découvrir ces nouveaux catalyseurs ? C'est probablement dans la Nature que se trouvent les plus performants, les **enzymes**. Ces **protéines** catalysent en milieu aqueux, avec un faible coût énergétique et dans des conditions généralement douces de température et de **pH**, des milliers de réactions hautement **chimio-**, **régio-** et **stéréosélectives**, sans générer de sous-produits toxiques. Certaines sont utilisées comme catalyseurs dans des processus industriels ou domestiques de synthèses ou de biodégradations. Les chercheurs tentent aussi de les imiter, soit en élaborant des protéines artificielles capables de catalyser des réactions originales, soit en concevant des assemblages de molécules issues de la chimie de synthèse et aptes à reproduire des réactions effectuées par les enzymes dans des systèmes biologiques. Plusieurs laboratoires du CEA sont directement impliqués dans ces différentes alternatives biocatalytiques ou bio-inspirées.

Enzymes, biocatalyse et chimie de synthèse

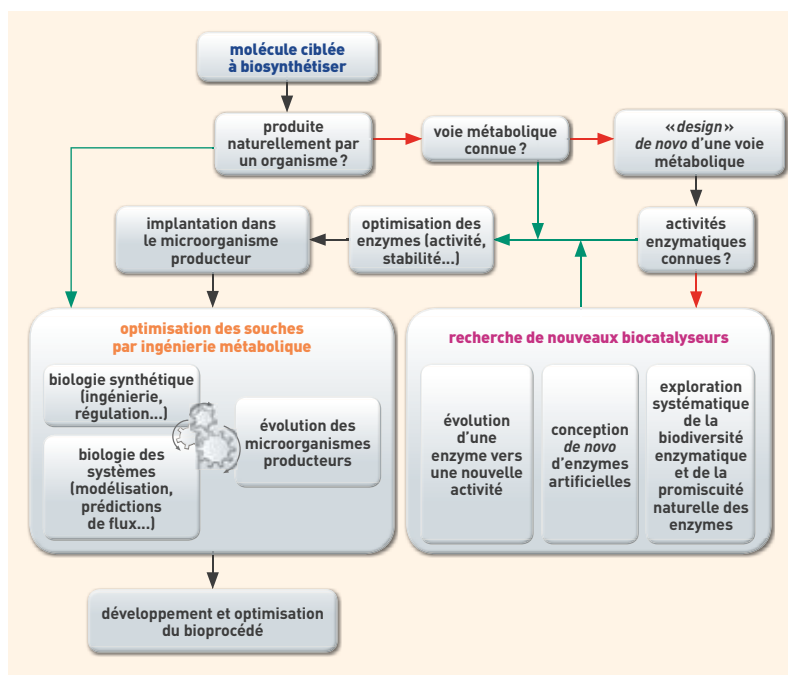
Dans la pratique, deux grandes voies offrent la possibilité de tirer profit des propriétés des enzymes. Historiquement, la première a consisté à utiliser directement les organismes vivants pour réaliser les transformations chimiques recherchées en vue d'obtenir un produit d'intérêt (figure 1). C'est la manière la plus verte, qui permet notamment d'accomplir *in vivo*, à un coût énergétique minimal, une succession de réactions en se servant de la **biomasse** comme matière première. Ainsi, ces procédés suscitent à l'heure actuelle un grand regain d'intérêt. Les **levures** et **bactéries** provenant de milieux naturels ont été les premiers microorganismes employés pour catalyser une ou plusieurs étapes réactionnelles du processus de production d'un composé chimique. Leurs rendements ont par la suite été améliorés par

des méthodes génétiques, puis par génie génétique. Aujourd'hui, des **gènes** issus de la biodiversité, codant des voies complètes de biosynthèse, parfois totalement inédites, sont introduits dans des microorganismes (figure 1). L'introduction de ces voies biosynthétiques exogènes est parfois mal tolérée par les cellules hôtes, allant jusqu'à compromettre leur viabilité. Pour aider ces cellules à se réadapter, on peut, dans certains cas, les laisser évoluer dans des automates de culture permettant d'alterner les conditions de croissance (voir l'illustration de gauche, p. 78). Les rendements sont également améliorés *via* l'optimisation des régulations et des équilibres chimiques au sein des cellules.

La seconde voie repose sur la mise en œuvre des enzymes elles-mêmes, en solution ou immobilisées. La panoplie d'enzymes connues et utilisables pour des applications industrielles reste cependant limitée et leurs qualités (efficacité, robustesse...) sont souvent insuffisantes. Outre l'amélioration de leurs propriétés par les méthodes d'évolution dirigée de gènes qui peut être pratiquée à l'aide des automates de culture mentionnés précédemment, il est possible d'explorer la biodiversité enzymatique pour découvrir de nouveaux biocatalyseurs. Les bases de données de **séquences d'ADN** regorgent en effet de gènes codant des fonctions inconnues, notamment des activités biocatalytiques inédites. Le **Genoscope** de l'Institut de génomique (IG) a entrepris d'exploiter ces gigantesques collections pour y trouver des gènes codant de nouvelles activités. Ce travail débute par la recherche de gènes candidats par des méthodes bioinformatiques. Ces candidats sont ensuite criblés à l'aide de tests à grande échelle sur des composés non physiologiques pour détecter des enzymes susceptibles de catalyser une transformation nouvelle, en s'appuyant sur le phénomène de promiscuité par lequel une enzyme donnée peut catalyser une réaction chimique sur différents composés chimiquement proches.

Biocatalyse et bioénergie

Les biotechnologies pour l'énergie sont en plein développement. Les hydrogénases⁽¹⁾ sont particulièrement intéressantes pour la production ou l'utilisation de l'hydrogène. Elles s'**adsorbent** spontanément sur certaines **électrodes** de carbone, les couvrant d'un film protéique et catalysent de manière remarquable, aussi bien que le platine dans certaines conditions, la production d'hydrogène ou son **oxydation**. La cristallographie révèle que leur site actif est un cluster⁽²⁾ binucléaire (figure 2) où deux atomes métalliques de nickel (Ni) et/ou de fer (Fe) sont connectés par des atomes de soufre (S), appartenant, soit à des résidus cystéine⁽³⁾ de la chaîne protéique – cas des hydrogénases nickel-fer (NiFe) –, soit constitutifs d'un petit **ligand** dithiométhylamine – cas des hydrogénases fer-fer (FeFe). Les atomes de fer sont, de plus, **coordinés** par des ligands monooxyde de carbone (CO) et cyanure (CN⁻). Des sites basiques,



comme certains ligands thiolates terminaux du site actif des hydrogénases NiFe ou la fonction amine du ligand dithiométhylamine des hydrogénases FeFe, jouent un rôle crucial en facilitant les réactions de protonation ou de déprotonation⁽⁴⁾ au cours du cycle catalytique. La structure cristallographique des hydrogénases montre également la présence d'une chaîne de clusters fer-soufre, distants les uns des autres de moins de 15 Å. Cette dernière permet aux électrons de circuler entre le site actif et la surface de la protéine, où ils sont amenés ou d'où ils sont extraits par les partenaires physiologiques des hydrogénases⁽⁵⁾, réductases notamment. Les équipes de l'IBS (Institut de biologie structurale) ont mis en

Figure 1. Stratégie mise en œuvre pour la production d'une molécule par un microorganisme. Les flèches vertes indiquent l'action suivie en cas de réponse positive à la question posée, contrairement aux flèches rouges qui renvoient vers une autre alternative.

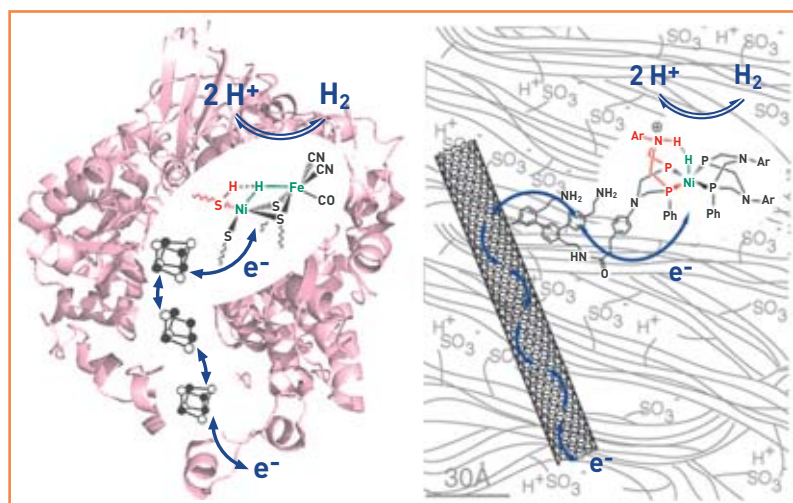


Figure 2.

À gauche, représentation schématique de la structure d'une hydrogénase NiFe. Les résidus cystéine (—S—), ligands des centres métalliques, sont symbolisés par leur atome de soufre. La cystéine terminale, fonctionnant comme une base dans le mécanisme catalytique, apparaît en rouge. L'interaction entre le ligand hydrure [H⁻] coordonné au site actif (en vert) et un proton porté par ce site basique est représentée par des pointillés. Les flèches bidirectionnelles bleues montrent les échanges d'électrons entre les centres fer-soufre de l'hydrogénase et le catalyseur. À droite, représentation schématique de la structure et de la réactivité du matériau obtenu par greffage du catalyseur bio-inspiré nickel-bisdiphosphine sur les nanotubes de carbone enrobés dans un film de Nafion®. Les fonctions amine du ligand diphosphine sont indiquées en rouge. L'interaction entre le ligand hydrure [H⁻] porté par l'atome de nickel (en vert) et un proton porté par une fonction amine est représentée par des pointillés. Les flèches bidirectionnelles bleues montrent les échanges d'électrons entre les nanotubes et le catalyseur.

(1) Hydrogénases : enzymes qui peuvent, soit produire de l'hydrogène à partir des protons H⁺ de l'eau et d'électrons, soit l'oxyder.

(2) Cluster : agrégat de plusieurs atomes.

(3) Cystéine : **acide α-aminé** naturel possédant un groupement thiol (—SH).

(4) Protonation/déprotonation : réaction chimique au cours de laquelle un proton H⁺ est ajouté/retiré à une molécule.

(5) Dans les systèmes biologiques, les réactions d'oxydation (perte de un ou plusieurs électrons) et de réduction (gain de un ou plusieurs électrons) sont catalysées par, respectivement, des oxydases et des réductases.

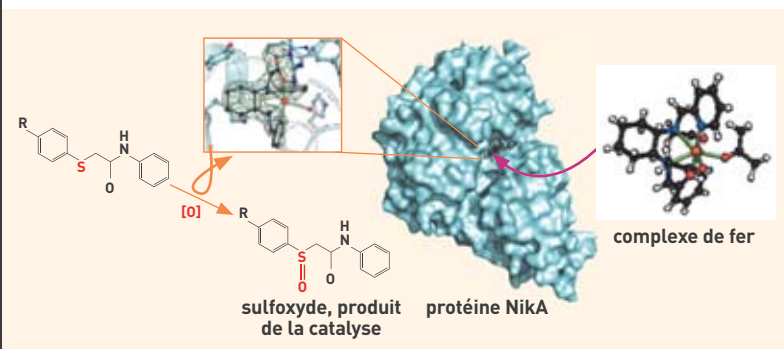


Figure 3. L'introduction d'un complexe de fer au sein de la poche hydrophobe de NikA, une protéine de transport de nickel, permet son activation pour la catalyse de transfert d'un atome d'oxygène, pour former un sulfoxyde. Le produit de la catalyse est un analogue potentiel de l'oméprazole, inhibiteur de la pompe à protons dans les muqueuses de l'estomac chez l'homme. La position du catalyseur chimique est identifiée par cristallographie des protéines.

évidence un chemin préférentiel au sein de la protéine pour le transfert des protons et pour la circulation des gaz. De fait, les hydrogénases sont de véritables petites usines à hydrogène dont la logistique est optimisée.

La chimie bio-inspirée et les enzymes artificielles

Les enzymes sont des biomolécules fragiles, qui le plus souvent ne développent leur activité que dans l'eau, dans des conditions assez restreintes de température, de pH ou de **force ionique**, et qui nécessitent des partenaires physiologiques. Une solution consiste à imiter le fonctionnement enzymatique pour élaborer des catalyseurs, dits bio-inspirés. Grâce à la connaissance, au niveau moléculaire, de la structure du site actif d'une enzyme, le chimiste peut, soit en faire une copie synthétique fidèle (modèle biomimétique), soit inventer de nouveaux catalyseurs s'inspirant de son mécanisme de fonctionnement ou de ses interactions avec ses partenaires biologiques (modèle bio-inspiré). Cette approche permet d'utiliser des éléments chimiques ou des combinaisons d'atomes que la Nature n'a ni explorées, pour des questions de biodisponibilité, ni sélectionnées, en raison par exemple de leur toxicité durant l'évolution. De tels catalyseurs présentent de multiples avantages. Faciles à synthétiser et peu coûteux à produire à grande échelle car ils ne renferment généralement pas de **métaux nobles** ou rares, ils peuvent, contrairement aux enzymes dont ils s'inspirent, être employés dans de nombreux solvants et dans une large gamme de température ou de pression. Ils sont également moins sensibles à l'oxydation par l'oxygène de l'air.

La conception d'hydrogénases artificielles

Les **complexes** bisdiphosphine de nickel sont un exemple de catalyseurs bio-inspirés de la structure du site actif des hydrogénases. Ils combinent des éléments structuraux pris aux sites actifs des deux types d'hydrogénases: l'ion nickel des hydrogénases NiFe et une fonction amine, incorporée cette fois dans un ligand diphosphine plutôt que dans le cofacteur dithiolate des hydrogénases FeFe. L'un de ces complexes a été choisi par une équipe du Laboratoire de chimie et biologie des métaux de l'Institut de recherches en technologies et sciences pour le vivant (iRTSV) pour développer, en collaboration avec une équipe de l'Iramis (Institut rayonnement matière de Saclay/Direction des sciences de la matière), le premier matériau sans métal noble capable de catalyser, comme le fait le platine, aussi bien

la production d'hydrogène à partir de l'eau (pour une utilisation dans les **électrolyseurs**) que son oxydation (pour un emploi dans les **piles à combustible**). En greffant le catalyseur bio-inspiré sur des nanotubes de carbone et en incorporant cet assemblage au sein d'une matrice de Nafion[®](6), il a été possible d'optimiser la logistique d'approvisionnement du site catalytique en protons et électrons, exactement comme cela est organisé au sein des hydrogénases (figure 2).

Les métallo-enzymes artificielles

Le contrôle de l'environnement proche du site où se déroule la catalyse est crucial pour l'optimisation de son activité. Ceci peut être obtenu *via* une approche originale consistant à créer des objets hybrides basés sur l'insertion d'un catalyseur inorganique au sein d'une protéine. On parle alors de métallo-enzymes artificielles. L'activité de l'enzyme artificielle est contrôlée par la nature du composant synthétique tandis que sa sélectivité dépend de la charpente protéique, ce qui permet à la fois d'obtenir des catalyses originales (des réactions non répertoriées par la biocatalyse) dans des conditions douces et de favoriser la sélectivité de la réaction visée. Il est ainsi possible de contrôler la stabilité de la protéine formée et de maîtriser les coûts de production. De récents résultats acquis au Laboratoire de chimie et biologie des métaux de l'iRTSV démontrent le potentiel des métallo-enzymes artificielles dans le cadre de réactions d'hydroxylations aromatiques(7) ou d'oxydations de sulfures. En collaboration avec le groupe Métalloprotéine de l'IBS, un nouveau type d'oxydases(5) efficaces de thioéthers (R-S-R') a été élaboré en fixant, par des **liaisons supramoléculaires**, un catalyseur bio-inspiré à base de fer au sein d'une protéine de transport de nickel, NikA (figure 3). Le complexe de fer n'est actif que s'il est inséré dans la protéine, démontrant ainsi la synergie des deux partenaires formant l'hybride. Un autre volet, plus fondamental, a permis de développer une nouvelle technique pour disséquer un mécanisme catalytique d'hydroxylation aromatique en alliant cristallographie des protéines et catalyse bio-inspirée.

Les procédés biologiques, alternative aux procédés industriels

Du fait de la crise énergétique et des contraintes environnementales, notre société va devoir proposer des alternatives à un grand nombre de pratiques industrielles existantes. Beaucoup de ces alternatives vont reposer sur la mise au point de procédés totalement ou partiellement biologiques ou s'inspirant directement des solutions mises en œuvre par la Nature. Plusieurs laboratoires de la Direction des sciences du vivant se sont déjà engagés activement et avec succès dans l'exploration de ces différentes voies. Le CEA contribue ainsi au développement d'alternatives énergétiques et de procédés biotechnologiques durables.

> Vincent Artero¹, Véronique de Berardinis², Stéphane Ménage¹ et Jean Weissenbach²

¹Institut de recherches en technologies et sciences pour le vivant (iRTSV)
Direction des sciences du vivant
CEA Centre de Grenoble

²Institut de génomique (IG)/Genoscope
Direction des sciences du vivant
Évry

(6) Nafion[®]: polymère fluoré échangeur de protons H⁺.

(7) Hydroxylation aromatique: ajout d'un groupement hydroxyle (OH) au cycle d'une molécule.

Les nanosciences et les nanotechnologies pour l'énergie

Nanosciences et nanotechnologies sont des sources majeures d'innovation pour l'ensemble des enjeux associés à l'énergie : la production et le stockage de l'énergie, la conversion et les économies d'énergie. En outre, elles dégagent des voies de progrès en ce qui concerne l'économie de la matière première, en particulier pour le remplacement ou la moindre utilisation des matériaux rares. **Le CEA dispose d'une large base de compétences dans ce domaine. Il la mobilise sur l'ensemble de ces enjeux, avec l'ambition de contribuer aux ruptures scientifiques requises face aux défis de la production d'énergies renouvelables et des économies d'énergie.**

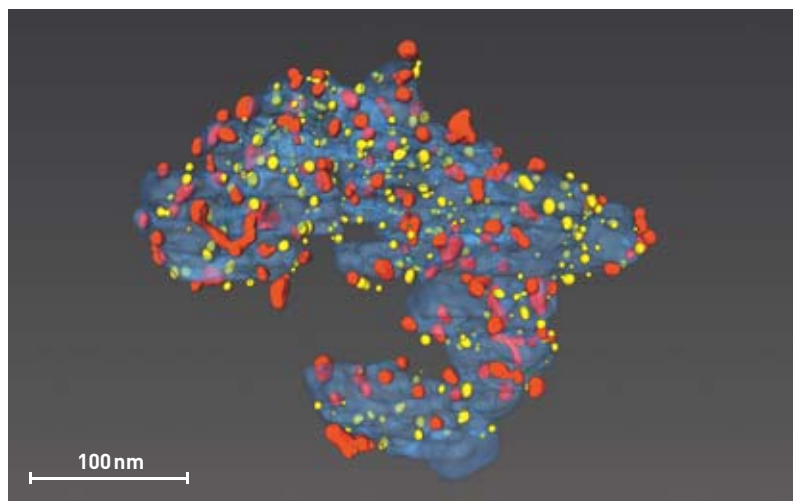
Les compétences en nanosciences et nanotechnologies du CEA reposent sur des techniques avancées de nanofabrication, d'auto-organisation de la matière, de caractérisation et de simulation numérique. Souvent, afin d'accélérer le parcours de l'innovation dans un contexte de vive concurrence internationale, les travaux effectués associent intimement, dès le départ, équipes de recherche amont et équipes de recherche technologique.

Produire de l'énergie électrique

L'énergie solaire **photovoltaïque** est certainement l'un des domaines où les bénéfices d'un contrôle de la matière à l'échelle **nanométrique** sont les plus évidents. La description des processus mis en jeu permet de le comprendre. Après la création de l'exciton (paire électron-trou) lors de l'absorption d'un photon incident au sein d'un matériau **semi-conducteur**, la génération du courant électrique repose sur la séparation des charges sous l'influence du champ électrique d'une **jonction p-n** : l'électron part vers un semi-conducteur **dopé n** et le trou vers un semi-conducteur **dopé p**. Dans une large mesure, le **rendement** de la **cellule photovoltaïque** dépend de l'efficacité de cette séparation. Les défauts des matériaux étant autant d'opportunités de recombinaison des charges produites, il est important de minimiser les distances de transport des électrons et des trous.

Dans le cas du solaire à base de semi-conducteurs, cette recherche conduit à explorer, au-delà de la classique structure en couches minces, des voies très innovantes comme les structures à base de nanofils semi-conducteurs, qui offrent la perspective de rendements comparables, avec une importante économie de matière. Ces solutions s'appuient sur une maîtrise avancée des procédés de nanofabrication pour réaliser les hétérostructures désirées (figure 1).

Dans le cas du photovoltaïque organique, les mêmes contraintes imposent le mélange intime de deux phases organiques semi-conductrices de types n et p et la réduction à quelques nanomètres des distances entre interfaces, afin d'optimiser la dissociation de l'exciton initial et le transport des charges photogénérées. Cet objectif mobilise les compétences des chimistes, tant



Catalyseur efficace d'une pile à combustible (PAC), le platine est un métal rare et coûteux qu'il convient d'économiser. Pour réduire sa quantité et optimiser le fonctionnement de la PAC, il est utilisé sous la forme de nanoparticules qui sont dispersées dans des matériaux supports poreux de taille nanométrique, souvent à base de carbone (noir de carbone). Les nanoparticules de platine réparties sur le noir de carbone, ici de la **cathode**, après 2000 heures de fonctionnement de la PAC, apparaissent nettement sur cette image obtenue en microscopie électronique à transmission (en tomographie) sur la plateforme de nanocaractérisation (PFNC) de MINATEC. Il est possible de voir que les plus grosses (> 10 nm, artificiellement colorées en rouge) se situent à la surface du noir de carbone, tandis que les plus petites (< 3 nm, colorées en vert) se trouvent à l'intérieur.

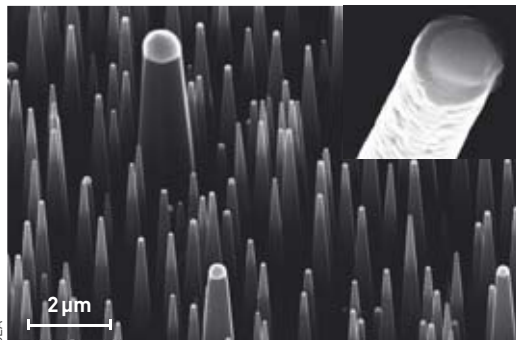
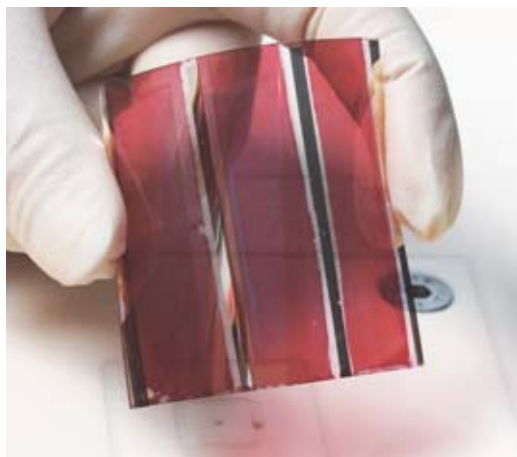


Figure 1. Nanofils de silicium élaborés par croissance CVD (Chemical Vapor Deposition) à l'Inac (CEA Grenoble). L'insert montre une hétérojonction radiale SiGe-Si (silicium germanium-silicium) dans un autre nanofil. Les deux images ont été obtenues en microscopie électronique. De telles géométries constituent un des axes de recherche pour de futures générations de cellules photovoltaïques, dans lesquelles le matériau actif est finement nanostructuré afin de combiner performances et économie de matière.

sur la synthèse de matériaux organiques n ou p plus performants, que sur la nanostructuration du matériau lors du mélange des **polymères** (figure 2). Sur la base de tels systèmes organiques, les meilleurs rendements obtenus aujourd'hui au CEA approchent les 7%.



Figure 2.
Cellule photovoltaïque organique flexible fabriquée au Liten (CEA Grenoble, site Ines). Le matériau actif de telles cellules est constitué de polymères semi-conducteurs organiques. Le travail des chimistes porte sur la synthèse des molécules adaptées pour absorber efficacement la lumière du spectre visible et sur la réalisation d'un mélange de polymères dont la nanostructuration est contrôlée afin d'optimiser le transport des électrons et des trous vers les électrodes.



P. Anavian/CEA

Stocker l'énergie

Les **batteries** sont un composant essentiel d'une transition vers une économie plus respectueuse de l'environnement : véhicules automobiles électriques, adaptation de l'offre à la demande avec le stockage de l'énergie produite par des sources intermittentes (photovoltaïque, éolien), etc.

Dans ce domaine, les nanomatériaux sont une source de progrès considérables, comme l'illustre le cas des batteries lithium-ion (Li-ion), l'une des technologies les plus performantes et les plus diffusées (voir *Énergie en batteries*, p. 56).

Ces batteries sont basées sur l'échange réversible de l'ion lithium, au travers d'un liquide **électrolytique**, entre une **électrode positive** (insertion de l'ion Li^+ , classiquement dans un composé tel que du phosphate de fer, FePO_4) et une **électrode négative** (insertion de l'atome de lithium). La **capacité** de la batterie dépend directement de la quantité de lithium pouvant être réversiblement stockée par chacune des électrodes. Le **silicium**, qui est à même de former une phase particulièrement riche en lithium ($\text{Li}_{15}\text{Si}_4$), apparaît ainsi comme un matériau d'insertion très prometteur. Cependant, l'insertion de telles quantités de lithium induit un gonflement important, d'un facteur supérieur à 3, du silicium. Ce gonflement conduit à la fragmentation du matériau lors des cycles de

charge-décharge des batteries. Face à cette difficulté, la nanostructuration du silicium apporte une solution : le phénomène de fracturation est bien plus limité pour des nanoparticules, plus aptes à supporter la contrainte associée au gonflement, qu'un matériau massif. Sur de tels enjeux, les équipes du CEA, ici celles de l'Institut rayonnement matière de Saclay de la Direction des sciences de la matière (Iramis/DSM) et de l'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux) de la Direction de la recherche technologique (DRT), sont actives, depuis la synthèse des nanomatériaux (figure 3) jusqu'à la réalisation de dispositifs technologiques permettant l'évaluation des performances et préparant le transfert industriel. Récemment, une équipe de l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac/DSM), en collaboration avec l'**Institut des Matériaux Jean Rouxel** (Nantes, Loire-Atlantique), a pour la première fois étudié les performances d'électrodes en nanofils de silicium pour des supercapacités. Dispositifs similaires aux batteries, les supercapacités permettent de délivrer une **densité de puissance** bien plus élevée, avec cependant une **densité d'énergie** stockée plus faible. Dans ce cas, des électrodes constituées de nanofils de silicium offrent une **densité de courant** 7 fois supérieure à celle d'une surface plane de silicium, tout en préservant une excellente tenue lors de cycles de charge-décharge répétés.

Convertir l'énergie

Face au caractère intermittent de la production des énergies renouvelables, le stockage de l'énergie sous d'autres formes, *in fine* non émettrices de gaz à effet de serre, est un enjeu majeur. L'hydrogène est un vecteur particulièrement efficace, dont la combustion est non polluante. Les **piles à combustible** reposant sur les membranes échangeuses d'ions sont une technologie relativement mature, mais exigent l'usage de quantités significatives de platine. Les équipes du CEA travaillent sur l'amélioration des technologies disponibles, notamment sur l'économie de platine, ainsi que sur l'exploration de voies de rupture.

Sur le premier axe, les dernières années ont enregistré des progrès significatifs, avec une forte diminution de la quantité de platine mise en œuvre. Dans ce contexte, il importe de disposer de techniques de caractérisation très avancées autorisant la connaissance de la structure des couches **catalytiques**, en particulier la distribution en taille et la répartition des particules de **catalyseur**. Pour ce faire, sur la plateforme de nanocaractérisation PFNC⁽¹⁾ de **MINATEC**, les équipes de l'Inac et du Liten s'appuient par exemple sur la technique de **tomographie électronique**. Il est ainsi possible de voir la distribution en trois dimensions des catalyseurs sur leur carbone support et de suivre son évolution à diverses étapes de la vie du dispositif (voir l'illustration p. 81).

Figure 3.

Synthèse de nanomatériaux. À gauche, installation pour la production de nanoparticules par pyrolyse laser (Iramis, CEA Saclay). Les nanoparticules sont élaborées lors de l'interaction entre un faisceau laser infrarouge et un flux de réactifs formé à partir de précurseurs gazeux ou liquides. Cette installation de recherche permet la fabrication de 60 g de nanoparticules de silicium par heure. Sur des matériaux similaires (carbure de silicium, SiC), des taux de production plus élevés, de l'ordre du kg/h, sont obtenus sur un pilote développé au sein du Département des matériaux pour le nucléaire de la Direction de l'énergie nucléaire (DMN/DEN). Les nanoparticules de silicium sont ensuite associées à d'autres matériaux pour constituer les électrodes de batteries. À droite, déchargement confiné d'un broyeur haute énergie semi-industriel contenant des poudres nanostructurées, au sein de la plateforme Nanomil (*Nanostructured materials by milling*) du Liten (CEA Grenoble). Nanomil est dédiée au transfert industriel (synthèse de matériaux nanostructurés pour batteries Li-ion).



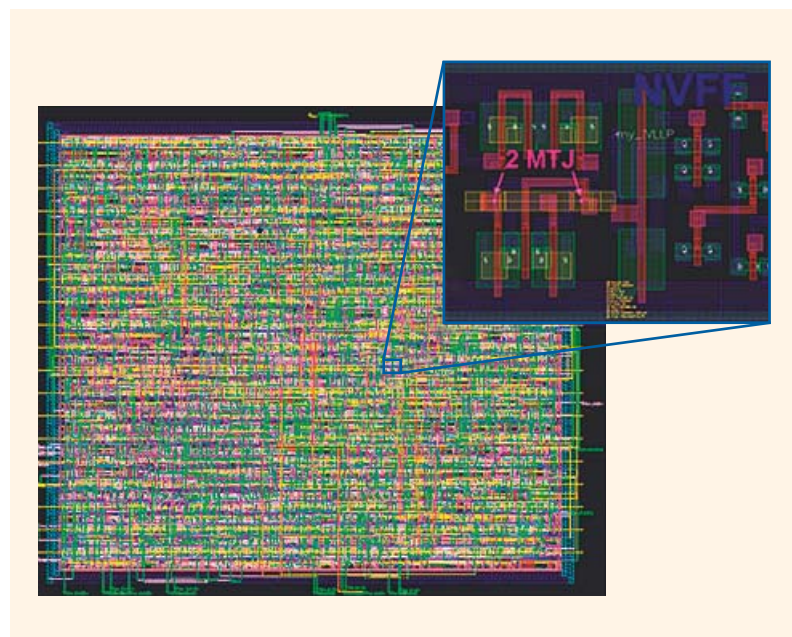
P. Anavian/CEA

(1) Pour faire face aux exigences de la caractérisation la plus avancée (expertise élevée, coûts d'investissements considérables) associée à ses programmes, le CEA a rassemblé au sein de la PFNC les équipes des Instituts Inac, Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information) et Liten. Recherche fondamentale et recherche technologique sont développées sur les mêmes outils, en assurant un passage rapide des développements méthodologiques conduits en amont vers les usages technologiques. D'autres techniques de caractérisation de la plateforme contribuent aux recherches pour l'énergie, comme les spectroscopies de surface, la diffraction X, les analyses par faisceaux d'ions ou la résonance magnétique nucléaire.

Économiser l'énergie

Les économies d'énergie constituent un dernier enjeu majeur. L'apport des nanotechnologies dans ce domaine est d'ores et déjà important. Ainsi, dans le cas de l'éclairage, les **diodes électroluminescentes** permettent la production de lumière avec une efficacité élevée à partir de **puits** ou de **boîtes quantiques**. Elles connaissent une vaste diffusion auprès du grand public. La start-up HelioDEL, créée en 2011 sur la base des travaux du CEA Grenoble, a ainsi pour ambition le développement de diodes à nanofils de nitrure de gallium (GaN) sur substrat silicium.

Dans un autre domaine, l'innovation réside dans les composants et dans l'architecture des circuits intégrés issus de la microélectronique. En effet, les processeurs des ordinateurs, des téléphones portables et de nombreux autres dispositifs sont une source importante de consommation d'énergie, non négligeable à l'échelle d'un pays. De plus, la consommation des circuits intégrés limite l'autonomie et donc les usages des appareils mobiles (téléphones, consoles de jeu...). Les mémoires de type MRAM⁽²⁾, sur lesquelles le laboratoire Spintec (Spintronique et technologies des composants)⁽³⁾ du CEA Grenoble a fortement innové, combinent consommation très faible, cyclabilité⁽⁴⁾ élevée, grande vitesse d'écriture, immunité aux radiations ionisantes et surtout non-volatilité. Les performances et l'intérêt de composants électroniques hybrides (CMOS⁽⁵⁾-MRAM) sont étudiés en vue de déterminer la réduction de consommation possible par comparaison aux technologies classiques de la microélectronique silicium (CMOS-SRAM⁽⁶⁾ et



CEA

DRAM⁽⁷⁾). Pour ce faire, les recherches combinent étude de la physique des composants élémentaires de type MRAM et travail sur la conception des futures architectures CMOS-MRAM (figure 4). En associant plus intimement fonctions logiques et mémoires dans l'architecture des circuits, il est par exemple possible de créer des circuits reprogrammables, à la fonctionnalité optimisée pour un calcul donné, et de réaliser une électronique *normally-off*, c'est-à-dire où les diverses parties d'un processeur ne sont alimentées que le temps nécessaire au calcul.

Un domaine prioritaire pour l'énergie

Le potentiel considérable des avancées issues des nanosciences et des nanotechnologies pour les technologies pour l'énergie a été identifié par l'ensemble des grands acteurs internationaux. Il se situe ainsi au premier rang des priorités de la National Nanotechnology Initiative aux États-Unis, dont le DoE (US Department of Energy) est maintenant la principale agence contributrice, et des priorités du Plan d'Action 2015 pour les nanotechnologies publié en 2011 par le Gouvernement fédéral en Allemagne. Sur la base des avancées déjà réalisées, l'apport des nanotechnologies à des domaines aussi divers que le solaire photovoltaïque, la récupération de chaleur (thermoélectricité), le stockage de l'énergie dans les batteries, les supercondensateurs ou les piles à combustible est désormais une réalité. Avec ses partenaires académiques et industriels, le CEA combine ses compétences en nanosciences et nanotechnologies, et son savoir-faire sur les systèmes industriels dans les nouvelles technologies pour l'énergie. Il entend ainsi répondre aux deux enjeux-clés de ces technologies : des performances améliorées et un développement technologique durable, permettant une diffusion à grande échelle des technologies en limitant le recours aux ressources non renouvelables (matériaux rares...).

> Yves Samson

Direction du Programme transversal
« Nanosciences »
CEA Centre de Grenoble

(2) MRAM: *Magnetic Random-Access Memory*. Cette mémoire non volatile est basée sur l'utilisation de **jonctions tunnel magnétiques**. Elle combine non-volatilité intrinsèque, immunité élevée aux radiations, grande vitesse à la lecture et à l'écriture, forte densité et faible consommation. Aussi est-elle aujourd'hui identifiée par la feuille de route de la microélectronique comme l'une des technologies les plus prometteuses pour au moins une partie des mémoires dans les applications logiques.

(3) Le laboratoire Spintec (CEA-CNRS-Université Joseph Fourier-Institut national polytechnique de Grenoble) et le Leti, en collaboration avec le Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier (Hérault) et l'Institut d'électronique fondamentale d'Orsay (Essonne), ont mis au point un ensemble d'outils logiciels pour évaluer les gains pouvant être obtenus en ajoutant des jonctions tunnel magnétiques dans les circuits intégrés, notamment dans les processeurs. Ces outils ont permis la conception du circuit représenté figure 4. Ils sont mis à la disposition de plusieurs partenaires nationaux et internationaux.

(4) Cyclabilité: aptitude d'un composant à passer de l'état 0 à l'état 1 sans dégradation. Les parties de la mémoire d'un ordinateur proches du processeur, sollicitées un grand nombre de fois, requièrent une cyclabilité très élevée (10^{14}).

(5) CMOS: *Complementary Metal Oxide Semiconductor*. Technologie de circuits intégrés basée sur l'utilisation de transistors de type MOS complémentaires (un étage de type p et un étage de type n). Elle est employée dans la quasi-totalité des applications purement logiques en raison de ses atouts (vitesse, fiabilité et faible consommation).

(6) SRAM: *Static Random-Access Memory*. Il s'agit d'une mémoire CMOS, donc volatile, extrêmement rapide mais peu dense (6 transistors par cellule mémoire). Elle est utilisée dans les applications nécessitant une grande vitesse, pour une quantité de données relativement faible, par exemple dans les mémoires caches des processeurs.

(7) DRAM: *Dynamic Random-Access Memory*. Cette mémoire est constituée d'une capacité et d'un transistor d'accès. L'information est stockée sous forme de charge électrique dans la capacité. Elle doit être rafraîchie régulièrement car la capacité se décharge spontanément au cours du temps. Cette mémoire moyennement rapide, mais très dense, est typiquement utilisée comme mémoire principale dans les ordinateurs.



Les transports électriques

Véhicules hybrides et hybrides rechargeables, auto-partage de voitures à batteries électriques dans un nombre croissant de villes, communes se dotant de tramways électriques et de bus à hydrogène ou encore bateaux électriques, automobiles et avions bientôt équipés de systèmes de piles à combustible... **La motorisation électrique connaît aujourd'hui un développement réel et touche tous les modes de transport.** Un déploiement permis par les progrès réalisés dans la conception des batteries électriques. Son avenir repose notamment sur la mise en place d'infrastructures appropriées, la compétitivité économique de la mobilité électrique, la poursuite des travaux de R&D dans ce domaine, en particulier en matière d'autonomie des batteries, et l'adaptation des usagers à ce type de transport.



Recharge du bus hybride rechargeable d'Irisbus sur la station de recharge rapide du CEA Grenoble.

La mobilité à venir peut être résumée en trois mots : propre, sûre et connectée. Étant donné la diversité des moyens de transport et des types de trajet, il n'existe pas de solution magique et universelle pour y arriver. Les véhicules thermiques vont continuer à fournir une part importante du parc pendant de nombreuses années encore. Cependant, les véhicules électriques vont prendre toute leur place dans le cadre de cette nouvelle offre. En effet, la mobilité électrique, sous toutes ses formes, permet de répondre à la fois aux défis environnementaux et énergétiques et à l'attente justifiée des populations pour une mobilité meilleur marché et plus pratique, notamment dans les pays émergents. Néanmoins, de nombreux challenges restent à relever, tels que la mise en place de nouveaux modèles économiques, l'établissement d'une nouvelle chaîne industrielle respectueuse de l'environnement, tenant compte dès sa conception de l'ensemble de la vie d'un véhicule (production, utilisation et recyclage), l'adaptation des infrastructures et l'adoption par les usagers de nouvelles habitudes de déplacement.

Des débuts difficiles

L'électrification des véhicules automobiles n'est pas une idée nouvelle. Les premiers moteurs électriques et les premiers **accumulateurs** rechargeables remontent au milieu du XIX^e siècle. Quant aux premiers véhicules, ils datent de la fin du même siècle, dont la célèbre «La Jamais contente», qui atteignit une vitesse de 106 km/h en 1899 et parcourut un trajet

sans recharge de 307 km en 1901. Cependant, après un démarrage prometteur au début du XX^e siècle, la motorisation électrique a été supplantée par la motorisation thermique. L'amélioration rapide des performances et de la fiabilité des moteurs, la baisse du coût du carburant, l'autonomie associée, la praticité d'usage avec l'essor des infrastructures (routes et stations-service) et l'arrivée d'un démarreur électrique ont eu raison de la traction électrique et de ses **batteries** au plomb lourdes, chères et sans autonomie réelle.

Au cours des années quatre-vingt-dix, le véhicule électrique (BEV pour *Battery Electric Vehicle*), équipé généralement de batteries nickel-cadmium (NiCd), a tenté une nouvelle percée, notamment en France. Sans plus de succès : seuls 10 000 véhicules ont été mis sur la route. Le coût, la durée de vie, l'assurance des batteries contre le risque ainsi que leur autonomie limitée ne répondaient pas aux attentes des usagers. En parallèle, les constructeurs automobiles ont développé la gamme des **véhicules hybrides** thermique/électrique (HEV pour *Hybrid Electric Vehicle*). Cette technologie offre des possibilités parfaitement adaptées à un usage diversifié de l'automobile. En ville, la conduite à vitesse faible et très variable profite du rendement élevé (de l'ordre de 90 %) du moteur électrique. Les batteries, généralement de chimie nickel-hydrure métallique (NiMH) et d'autonomie réduite (quelques kilomètres), sont rechargées par le moteur thermique positionné à son rendement maximal. Sur les trajets interurbains et sur autoroute, le moteur thermique reprend ses droits et assure une grande autonomie, liée au carburant liquide.

Lancée en 1997, la Toyota Prius, pionnière des véhicules hybrides, a dépassé les 2 millions de modèles vendus. Même si le taux de pénétration des véhicules hybrides reste encore bas comparé à l'ensemble du parc automobile, nul ne doute que l'élan est donné. Ainsi, de nombreux constructeurs comptent désormais au moins un véhicule de ce type dans leur gamme.

Véhicules électriques : un marché en émergence

Le développement des batteries lithium (voir *Des batteries pour la mobilité électrique*, p. 56), dotées de **densités d'énergie massique** et **volumique** accrues, acceptant de nombreux et rapides cycles

de charge-décharge et présentant des durées de vie améliorées, a conduit les constructeurs automobiles à lancer, à partir de 2010, une troisième tentative de déploiement de véhicules électriques. Les modèles proposés offrent des autonomies de 70 à 150 km, qui dépassent largement la distance moyenne parcourue quotidiennement par un automobiliste. Leur avantage est notable pour des usages urbains ou une utilisation locale à la campagne. Le nombre d'immatriculations, bien qu'encore très faible (0,2 % du marché automobile français en 2011), est en augmentation : il a atteint en 2012 plus du double des immatriculations délivrées en 2011. Parmi les déploiements les plus significatifs figurent les Bluecar d'Autolib', service d'auto-partage parisien, les Ion et les C-Zéro, et les véhicules utilitaires, de type Kangoo, commandés à 15 000 exemplaires par la centrale d'achats de l'État (Union des groupements d'achats publics) pour le compte d'une vingtaine d'entreprises publiques ou privées. De nouveaux véhicules électriques sont apparus au cours du second semestre 2012, avec notamment l'entrée remarquée de la Fluence. Toutefois, le décollage des ventes de véhicules électriques pourrait venir des petits véhicules urbains ou des quadricycles, qui proposent un compromis intéressant entre la sécurité, la maniabilité et la facilité de stationnement en environnement urbain par rapport aux voitures et aux scooters.

Hybrides rechargeables et véhicules à hydrogène

Pour répondre à la fois à la volonté de réduire les émissions polluantes, notamment en milieu urbain, tout en préservant une autonomie de plusieurs centaines de kilomètres, les véhicules hybrides évoluent avec l'apparition des **véhicules hybrides rechargeables** (PHEV pour *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*). D'architecture comparable aux hybrides classiques, ces véhicules offrent une autonomie accrue en mode électrique, de 15 à 60 km, grâce à l'intégration d'une batterie lithium de plus grande **capacité** et la possibilité de la recharger à une prise

électrique. Les premiers véhicules en vente sont la Chevrolet Volt aux États-Unis, l'Opel Ampera et la Toyota Prius Rechargeable en Europe.

Un pas supplémentaire dans la recherche d'une automobile propre à grande autonomie est franchi avec l'avènement des véhicules à **pile à combustible** (FCEV pour *Fuel Cell Electric Vehicle*). Des progrès significatifs dans la technologie des piles à combustible (PAC) ont été réalisés ces dernières années, aussi bien en termes de performance et de durée de vie, que d'intégration – utilisation de châssis standards pour des systèmes de 90 kW –, d'autonomie – la Toyota FCHV-adv (*Fuel Cell Hybrid Vehicle-advanced*) a parcouru 760 km sans émettre de gaz carbonique (CO₂), mieux que l'essence! – et de coûts – réduction de 80 % depuis 2002 conduisant, d'ici 2025, à un coût total de possession⁽¹⁾ comparable à celui d'un véhicule thermique ou à batterie, voir *La compétitivité des déplacements électriques*, p. 87. Les retours des centaines de démonstrateurs, avec plus de 15 millions de kilomètres effectués et plus de 90 000 pleins, confortent les constructeurs automobiles comme Daimler, General Motors, Toyota, Honda ou Nissan, qui ont annoncé le lancement commercial de ce type de véhicule pour 2015. Une PAC de plus faible puissance (5 à 40 kW) est aussi intégrée comme prolongateur d'autonomie dans des véhicules, notamment utilitaires.

L'autre défi à relever pour les FCEV est le développement d'une infrastructure hydrogène (H₂). Plusieurs centaines de stations H₂ sont déjà déployées à travers le monde et des initiatives de création de voies hydrogène se multiplient en Amérique du Nord, dans les pays scandinaves, au Royaume-Uni et en Allemagne, pays qui visent l'installation de 500 à 1 000 stations d'ici 2020. L'évolution récente de la réglementation sur la circulation de véhicules à hydrogène sur la voie publique devrait favoriser les initiatives de même type en France (figure).

(1) Le coût total de possession (CTP) représente l'ensemble des dépenses afférentes à la possession d'un véhicule : achat, entretien, réparations, consommation de carburant.

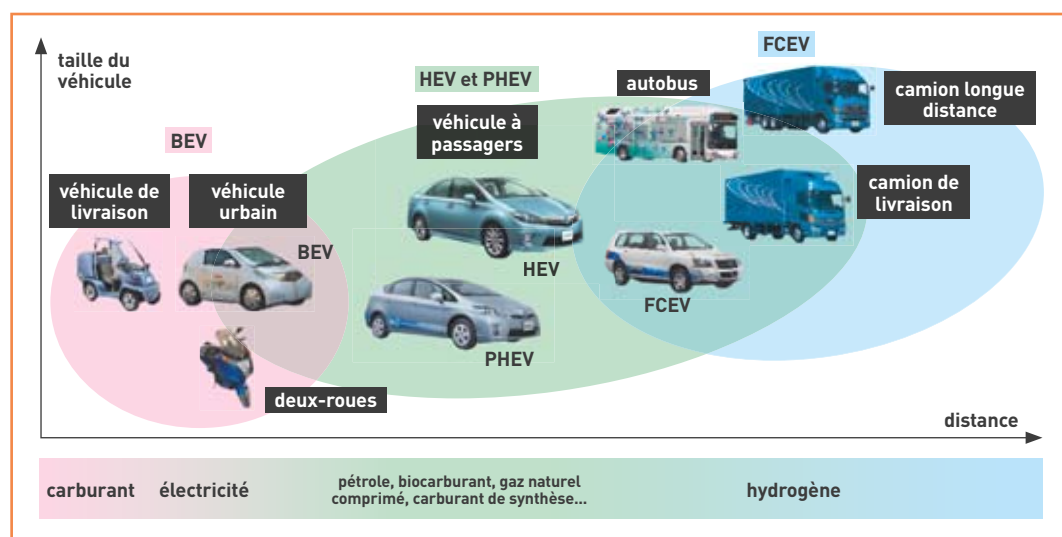


Figure. Offre complémentaire de motorisations électriques pour le transport terrestre en fonction des usages. Elle permet de répondre à la diversité des types de trajet et aux attentes des usagers : véhicules électriques à batterie (BEV) pour les trajets à rayons d'action limités, véhicules hybrides thermique/électrique (HEV) et véhicules hybrides rechargeables (PHEV) pour un usage mixte urbain/moyennes distances et véhicules à pile à combustible (FCEV) pour les moyennes/longues distances, sans émission de CO₂.



Le voilier Zéro CO₂, naviguant au large d'Ajaccio. Long de 12 m, il est équipé d'une batterie lithium et d'un système de PAC de 25 kW. Ce dernier alimente le moteur auxiliaire électrique du voilier. Des énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique) subviennent aux besoins du bord.

Tous les transports sont concernés

L'électrification ne se limite pas à l'automobile ; elle s'adresse à tous les modes de transport et à tous les types de véhicules. Ainsi, nombre de véhicules spéciaux, tels des véhicules d'aéroport ou de propreté urbaine, des chariots élévateurs..., sont équipés depuis plusieurs années de moteurs électriques. La nouveauté réside dans l'introduction de systèmes de PAC quand un fort besoin en autonomie est nécessaire ou pour des activités continues. C'est notamment le cas des chariots élévateurs : plus de 3000 unités ont été vendues avec, puis sans incitations financières ces deux dernières années dans des centres logistiques comme ceux de Coca-Cola ou US Postal. Le bilan de leur exploitation est très positif tant sur le plan de la productivité que sur celui du retour sur investissement. Cela présage un déploiement important dans les années à venir.

Le monde aéronautique n'est pas à l'écart et s'intéresse à l'électrification de sa flotte. Même si l'électricité à bord des avions est actuellement produite par des turbines et des groupes électrogènes à carburant fossile, des systèmes de PAC ont été testés comme auxiliaires de puissance (APU), par exemple le système 20 kW de Michelin évalué dans un A320. Les avionneurs (Airbus, Boeing) visent des premiers vols commerciaux équipés de systèmes de PAC, pour l'alimentation d'applications non essentielles, avant 2020.

Le marché maritime suit la même évolution. L'offre de bateaux électriques ne cesse de croître, notamment dans le domaine touristique. Les batteries employées actuellement sont au plomb. Le coût encore trop élevé des batteries lithium reste le frein majeur à leur introduction. De même que pour les voitures, une augmentation de l'autonomie passe par l'ajout de systèmes de PAC, soit en tant qu'APU, soit pour la motorisation. À ce propos, le CEA a récemment démontré, à travers son voilier Zéro CO₂

(2) Le trolleybus est un autobus propulsé par un moteur électrique alimenté par deux lignes aériennes de contact (caténaires).

équipé d'une motorisation électrique hybride batterie lithium/système de PAC, la faisabilité et l'intérêt de ces nouvelles technologies.

Des flottes d'autobus moins polluantes

La réduction de la pollution dans le transport terrestre passe aussi par l'intensification de transports en commun propres. De nouvelles gammes d'autobus ont été développées : bus électriques à batterie, bus hybrides thermiques, bus à hydrogène. Une vingtaine de bus à PAC sont ainsi en service à Vancouver (Canada) depuis les Jeux olympiques d'hiver de 2010 et des bus comparables ont été déployés pour les Jeux olympiques de 2012 à Londres (Royaume-Uni).

Le bus électrique représente aujourd'hui une fraction infime du parc français (200 trolleybus⁽²⁾ pour un parc de 20 000 bus). Ceux roulant en ce moment ont un coût d'exploitation supérieur aux bus diesel ou gaz, dû au remplacement fréquent des batteries. Le trolleybus nécessite de plus des installations filaires onéreuses et jugées disgracieuses. Le bus à batterie actuel souffre d'une autonomie trop faible, associée à un volume et à une masse de stockage d'énergie trop élevés qui réduisent sa capacité d'emport en passagers. Ces inconvénients empêchent de jouir de leurs avantages : confort, silence, performances, très peu d'émissions de CO₂ et un prix kilométrique de l'énergie trois fois plus bas que celui du diesel.

La problématique des bus électriques ou hybrides rechargeables est liée au dimensionnement de la batterie. Deux options sont possibles : des batteries permettant de tenir la durée d'un poste ou une batterie plus petite associée à une recharge rapide partielle en bout de ligne. Cette dernière solution est actuellement expérimentée au CEA dans le cadre d'un projet AMI (Appel à manifestations d'intérêt) de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) piloté par Irisbus (projet ELiSup, voir *Des batteries pour la mobilité électrique*, p. 56). Le déploiement de ces autobus nécessite le développement de la meilleure solution technique et économique de borne de recharge rapide de forte puissance (200 kW), réglable en tension pour s'adapter au niveau requis pour chacun des bus en exploitation (300 V, 600 V...) et minimisant l'impact sur le réseau. Suivant la longueur des lignes et la distance entre les nœuds du réseau, les bus électriques à recharge en fin de ligne ont un coût sur la durée de vie équivalent au diesel. Les bus hybrides rechargeables verraient quant à eux leur bilan consommation diesel diminuer de 40 à 50 % au lieu de 15 à 25 % pour l'hybride non rechargeable. Les résultats obtenus en 2012 sont très prometteurs et plusieurs agglomérations se sont déjà déclarées intéressées.

Les technologies actuelles présentent une offre complémentaire de motorisations électriques (batterie, hybride, pile à combustible) et un niveau de maturité permettant de répondre à la diversité des types de trajet et de transport et aux attentes des usagers.

> Laurent Antoni

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble

La compétitivité des déplacements électriques

Pour des raisons environnementales et stratégiques, les modes de propulsion des transports se diversifient depuis peu : emploi de carburants de synthèse dans les moteurs à combustion interne, véhicules fonctionnant au gaz naturel, électrification du parc automobile, que ce soit pour les **véhicules hybrides rechargeables**, ou pour les véhicules entièrement électriques à **batterie** (BEV pour *Battery Electric Vehicle*) et/ou à **pile à combustible** (FCEV pour *Fuel Cell Electric Vehicle*)... Qu'en est-il aujourd'hui des compétitivités respectives de ces différents systèmes ?

Une analyse technico-économique globale de la mobilité doit prendre en compte non seulement les données relatives aux composants technologiques majeurs des différentes motorisations, présentes et futures, des véhicules (moteurs à combustion interne, moteurs électriques), mais aussi les besoins réels de mobilité de la population, notamment pour des raisons d'autonomie encore faible des BEV. Un rapport du CGDD⁽¹⁾ indique en effet que la motorisation à autonomie limitée peut répondre à bien des besoins du parc de véhicules particuliers légers en France : pour une distance moyenne parcourue de 15500 km/an, plus de 90 % des déplacements journaliers se font sur une distance inférieure à 100 km, soit l'autonomie type des véhicules électriques qui vont être mis sur le marché à très court terme. Les 10 % restants représentent cependant 37 % du kilométrage total, ce qui laisse une place confortable aux modes de déplacement offrant une grande autonomie (véhicules classiques et à pile à combustible).

Les véhicules électriques à batterie

Lorsqu'une mobilité électrique peut se substituer à tout ou partie de la mobilité pétrole classique, la compétitivité du « carburant électrique » pris au réseau est bien réelle, en tout cas au prix actuel de cette énergie en France dans le cadre d'un contrat domestique (par exemple recharge de nuit de véhicules à batterie ou hybrides rechargeables). À condition de ne pas être soumis à un équivalent de la taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques (TICPE). En revanche, une analyse économique en coût total de possession (CTP : achat, entretien, réparations et consommation), par exemple sur une durée de dix ans et prenant en compte les différences de coûts d'investissement, montre que le déplacement électrique n'est, hors subventions telles que pratiquées aujourd'hui, pas rentable si les coûts des batteries restent élevés, par exemple autour de 300 €/kWh (figure 1), valeur moyenne envisagée en 2020 par une étude européenne⁽²⁾. Il apparaît par ailleurs qu'il n'est pas intéressant de rechercher des autonomies élevées, notamment pour des distances annuelles parcourues inférieures à 30 000 km : la fréquence des trajets journaliers longs ne justifie pas un surinvestissement en **capacité** de stockage.

Les véhicules électriques à pile à combustible

La segmentation des déplacements n'a, dans ce cas, pas d'impact sur la compétitivité des déplacements en véhicule à hydrogène (H₂) par rapport aux véhicules classiques. En effet, plusieurs centaines de

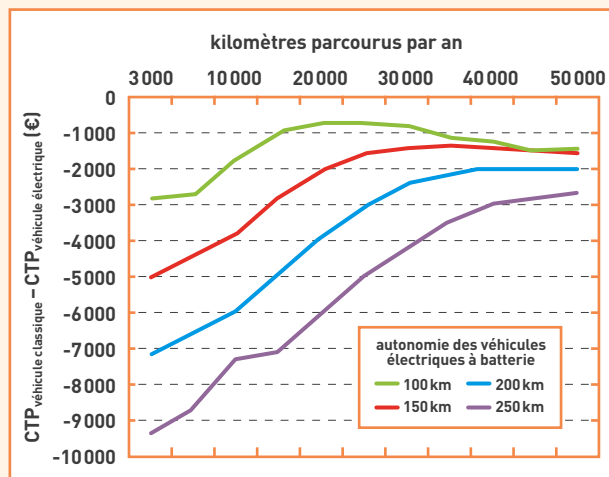


Figure 1. Différences des coûts totaux de possession (CTP) de véhicules classiques et électriques à batterie (autonomies variables, prix de la batterie = 300 €/kWh, pour 10 ans d'usage (taux d'actualisation de 5 %).

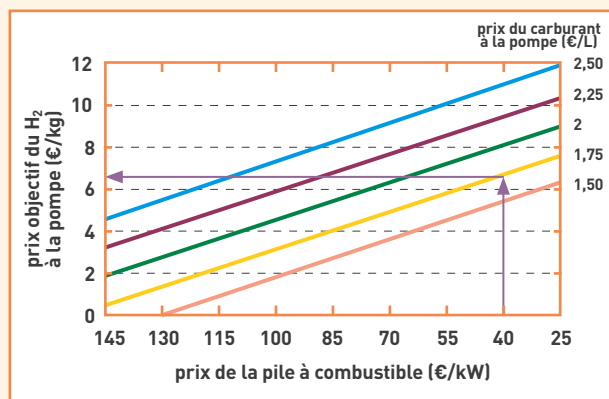


Figure 2. Prix objectifs de l'hydrogène à la pompe en fonction des coûts des piles à combustible (pile de 70 kW, 15000 km/an, sur 10 ans, taux d'actualisation de 5 %).

kilomètres pourront être parcourus d'une traite pour des durées de rechargement quasiment identiques. En revanche, le prix des piles à combustible, exprimé généralement en €/kW, influe grandement sur les seuils de rentabilité de l'hydrogène à la pompe, confirmant ainsi l'intérêt des recherches dans ce domaine. Comme le montre la figure 2, en raisonnant en CTP, un véhicule à pile à combustible de 70 kW, au coût de 40 €/kW⁽²⁾ et consommant 1 kg de H₂/100 km (valeur actuelle du véhicule en question) serait compétitif avec un véhicule classique similaire consommant 5,6 L/100 km, si les prix des carburants à la pompe sont respectivement d'environ 6,8 €/kg de H₂ et 1,75 €/L. Le DoE (US Department of Energy) envisage d'ores et déjà un coût cible de 30 \$/kW (autour de 20 €/kW), pour une production de masse à moyen terme⁽³⁾. Ceci rendrait l'hydrogène carburant compétitif jusqu'à 8 €/kg. Un objectif qui semble tout à fait réalisable.

> **Alain Le Duigou, Yuan Guan et Aïmen Smatti**

Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (I-tésé)
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay

(1) Stéphanie DEPOORTER et Pierre-Marie ASSIMON, « Les véhicules électriques en perspective. Analyse coûts-avantages et demande potentielle », mai 2011, Commissariat général au développement durable (CGDD). Téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-vehicules-electriques-en.html>.

(2) « A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles », McKinsey & Company, novembre 2010. Téléchargeable à l'adresse suivante : http://www.fch-ju.eu/sites/default/files/documents/Power_trains_for_Europe.pdf.

(3) 2011 Annual Merit Review Proceedings, US Department of Energy. Téléchargeable à l'adresse suivante : http://www.hydrogen.energy.gov/annual_review11_fuelcells.html.



Améliorer la performance énergétique de l'habitat

Construire des bâtiments plus économes en énergie, sans réduire le confort des habitations et sans impact négatif sur la facture des particuliers est un enjeu fort de la politique énergétique française. C'est aussi un des axes de développement stratégique du CEA.

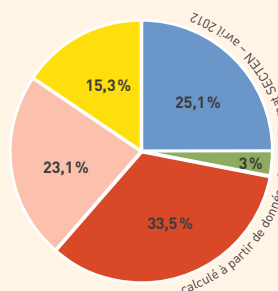
Ses chercheurs conçoivent au quotidien des innovations, testées sur des plateformes de démonstration qui font le lien entre la R&D et les performances en milieu réel. À la clé, l'optimisation énergétique des constructions, de la conception à la gestion de toutes leurs composantes, en neuf comme en rénovation.



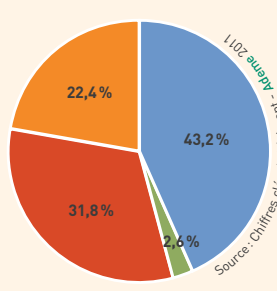
P. Auvian/CEA

P. Riffard/CEA

La plateforme Incas. Située à l'Ines, elle comporte trois maisons expérimentales totalement instrumentées, les cellules PASSYS associées (une cellule en bas à gauche) et plusieurs bancs pour tester l'intégration de systèmes photovoltaïques en toiture. Les cellules PASSYS permettent de développer et de caractériser des composants d'enveloppes et de systèmes CVC (chauffage, ventilation et climatisation) innovants. Cet outil de recherche offre aux scientifiques les moyens d'appréhender le comportement de dispositions constructives nouvelles.



■ résidentiel-tertiaire
■ agriculture et sylviculture
■ transports
■ industrie manufacturière
■ transformation d'énergie



■ résidentiel-tertiaire
■ agriculture et pêche
■ transports
■ industrie (y compris la sidérurgie)

Figure 1.
À gauche, répartition par secteur d'activité des émissions de gaz à effet de serre en France métropolitaine en 2010. Les émissions du résidentiel-tertiaire dépendent des conditions climatiques. Des températures douces permettent de réduire la consommation de chauffage et donc les émissions de gaz à effet de serre. L'année 2010 a été particulièrement froide.
À droite, consommation d'énergie finale en France par secteur en 2010. Le secteur du résidentiel-tertiaire est responsable de plus du quart des émissions de gaz à effet de serre. C'est également celui qui consomme le plus d'énergie.

Le domaine de la construction représente aujourd'hui, en France et en Europe, le secteur d'activité le plus énergivore et le plus émetteur de gaz à effet de serre (figure 1). Plus particulièrement, le secteur de l'habitat en France recèle de nombreuses passoires thermiques⁽¹⁾ qu'il convient de rénover et de classer à l'aide de la fameuse étiquette énergétique, bien connue du public pour sa généralisation dans le secteur des produits électroménagers.

L'habitat est appelé à subir une révolution majeure, tant au niveau de la conception – cas des bâtiments neufs (Bâtiment Basse Consommation ou BBC et Bâtiment à Énergie Positive ou BPOS) qui constituent moins de 3 % du parc total – que de la rénovation (part principale du marché à venir). En effet, qu'il s'agisse du réchauffement climatique et de l'augmentation des coûts de l'énergie, qui vont peser de façon sensible sur la facture des usagers, ou de la complexité croissante des équipements au sein de l'habitat (**domotique**, sécurité, multimédias, assistance aux personnes âgées...), le bâti doit s'adapter... et vite !

Un axe stratégique pour le CEA

De près ou de loin, plus de 400 chercheurs du CEA œuvrent dans le sens de l'amélioration énergétique du bâtiment. Ils trouvent dans ce domaine d'activité un terrain d'expérimentation et de démonstration idéal pour accueillir les nombreuses briques technologiques élaborées dans leurs laboratoires de recherche. Il s'agit, par exemple, de composants et de systèmes énergétiques (génération, stockage d'énergie électrique, thermique) pour la production d'électricité, de chauffage en hiver ou de rafraîchissement en été ; de dispositifs permettant de capter, mesurer et transmettre toute information utile à l'amélioration de la performance énergétique, en relation étroite avec les attentes des usagers ; de la conception de solutions (logiciels, interface homme-machine...) à même d'interpréter et d'afficher sans erreur, sous une forme compréhensible par un large public, les informations issues des capteurs.

Les sujets d'innovation appliqués au secteur de l'habitat ont été initiés au sein du Laboratoire énergétique

(1) Le secteur français de l'habitat est caractérisé par 31 millions de logements (17 millions de logements individuels et 14 millions de logements collectifs), dont les deux tiers ont été construits avant la première Réglementation thermique de 1974. Le chauffage représente plus de 70 % de la consommation d'énergie.

du bâtiment (LEB) de l'Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux), créé en 2005 à l'**Ines (Institut national de l'énergie solaire)**. Ils se sont depuis élargis à plusieurs autres thèmes: intégration à l'habitat de l'énergie solaire, **photovoltaïque** puis thermique (objectif de performances technique et socio-économique); étude des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment et de ses techniques constructives; diagnostics de bon fonctionnement et de bon usage des habitats neufs et rénovés; amélioration de la qualité de l'environnement intérieur et de l'air. L'importance de ce dernier aspect va croître pour les habitations ayant un degré d'isolation rendant obligatoire la présence de dispositifs de renouvellement de l'atmosphère à des fins de performance énergétique et surtout de salubrité et de santé publique.

Le LEB constitue pour l'ensemble des chercheurs de la Direction de la recherche technologique (DRT), mais aussi de la profession du bâtiment et des acteurs académiques, un lieu d'expérimentation exceptionnel, compte tenu de sa dimension systémique qui lui permet de tester n'importe quel composant (production de chaleur, froid, énergie, stockage...) en association avec d'autres produits, dans un souci de performance globale.

Des plateformes pour tester l'habitat

Outils de modélisation en amont, de caractérisation, de simulation, tests en grandeur réelle des solutions à l'échelle de vraies constructions: les plateformes technologiques du CEA comme la plateforme Incas (Instrumentation de nouvelles constructions d'architecture solaire) de l'Institut Liten à l'Ines, ou la plateforme @Home de l'Institut Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information) à Grenoble, sont complémentaires pour tester des systèmes constructifs innovants ou des composants dialoguant ensemble.

La plateforme Incas

Cette plateforme est dédiée au développement d'habitations à énergie positive, c'est-à-dire produisant plus d'énergie qu'elles n'en consomment sur une année. Elle se compose à ce jour de trois maisons expérimentales –deux conçues avec des techniques basées sur le béton et une avec une ossature en bois– d'environ 80 m² sur deux niveaux. De forme géométrique et de disposition identiques pour faciliter la comparaison des résultats, ces maisons sont équipées de **panneaux solaires photovoltaïques** et thermiques et dotées d'instruments qui simulent les gestes d'habitants au quotidien (douche, ouverture/fermeture des volets...). En outre, la plateforme comprend des cellules **adiabatiques** PASSYS mobiles en rotation, qui permettent d'expérimenter plusieurs conditions d'éclairement naturel et d'apprécier la performance thermique d'éléments de façades interchangeables. Elle comporte également plusieurs toitures pour tester l'intégration de systèmes photovoltaïques dans les bâtiments (voir *Production décentralisée d'électricité : le solaire intégré au bâti*, p. 36).

D'autres compétences du CEA, issues par exemple des laboratoires systèmes⁽²⁾ de l'Ines ou de DRT, viennent compléter celles du LEB sur plusieurs domaines de l'habitat individuel:



P. Auvian/CEA

Mise en place de capteurs à l'intérieur de l'une des maisons expérimentales de la plateforme Incas.

- systèmes pour l'utilisation de l'énergie (électrique/thermique/climatisation);
- stockage électrique et thermique;
- automation, *monitoring*, systèmes de gestion de l'énergie;
- diagnostic et maintenance prédictive;
- logiciels;
- systèmes pour la production d'énergies photovoltaïque et thermique;
- industrialisation, préfabrication, production industrielle;
- labels et certification.

L'habitat collectif et les éco-quartiers font eux aussi l'objet de travaux qui concernent, entre autres, les interactions entre immeubles, les réseaux de chaleur (*heat network*, smart grids thermiques) ainsi que la production et le stockage d'énergies électrique et thermique à l'échelle des quartiers.

Toutes ces activités de R&D dépassent le cadre du Liten et rejaillissent sur l'ensemble des deux autres instituts de la DRT, le Leti et le List (Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies).

La plateforme @Home

Cette plateforme a été conçue par le Leti [Département systèmes et intégration de solutions (DSIS) et Département architectures conception logiciels embarqués (DACLE)] pour maîtriser la complexité et le caractère hétérogène des « dispositifs intelligents » pour l'habitat. Elle accueille les briques technologiques du Leti et de ses partenaires, avec trois enjeux: le déploiement simplifié des systèmes de capteurs eux-mêmes (température, humidité, luminosité, gaz carbonique CO₂...); la gestion de leur interopérabilité et le traitement de leurs données pour déclencher des actionneurs (dalles lumineuses, volets roulants...); l'optimisation de leur consommation et l'autonomie en énergie des capteurs et actionneurs. Pour cela, les techniques développées doivent respecter les contraintes zéro câblage et zéro maintenance.

L'établissement de cette plateforme a nécessité la mise en œuvre ou le développement de systèmes communicants de capteurs et d'actionneurs du Leti ou du



CEA/Leti - G. Cottet

Un capteur Homes. Développés par Schneider Electric et le CEA/Leti, les capteurs Homes sont des dispositifs fonctionnant en réseau et communiquant, sans fil, pour le contrôle des paramètres du confort (température, luminosité, humidité et CO₂). Simples à installer, de faible encombrement et alimentés à partir d'une cellule solaire, les capteurs Homes sont autonomes en énergie et ne nécessitent aucune maintenance.

(2) Laboratoire des systèmes solaires (L2S)/Laboratoire de stockage de l'électricité (LSE)/Laboratoire d'étude des systèmes thermiques (LETH).



CEA/Leti - G. Cottet

À gauche, interface graphique sur Smartphone et à droite, interface graphique sur PC, développées pour la plateforme @Home. La plateforme est multimodale : il est possible d'interagir de différentes manières.

commerce répondant aux domaines (énergie, santé et bien-être, sécurité) et aux critères visés ainsi que la conception d'un *middleware*⁽³⁾ et d'une interface graphique sur Smartphone.

Les capteurs et les actionneurs présentent une grande hétérogénéité dans leur type et leur mode de communication, hétérogénéité qui, inmanquablement, se retrouvera dans une habitation. Elle tient à la diversité de leurs modes de liaison. Ils peuvent en effet être connectés par des liaisons filaires – c'est le cas des capteurs actuels de **formaldéhydes** de la société ETHERA⁽⁴⁾ – ou par des liaisons **radiofréquences**. Ces dernières sont de trois types :

- liaisons radiofréquences propriétaires⁽⁵⁾ du Leti pour répondre à des contraintes applicatives : réseau de capteurs de vibrations, système multi-capteurs (luminosité, température, accéléromètre, magnétomètre) ;
- liaison radiofréquence ZigBee⁽⁶⁾ : système de capteurs de présence, plafonnier à **diode électroluminescente** (LED pour *Light-Emitting Diode*), dalle colorimétrique à LED, prise intelligente ;
- liaison radiofréquence ZigBee Green Power⁽⁶⁾ : système de capteurs Homes⁽⁷⁾ (température, CO₂, humidité et luminosité) développé en partenariat avec Schneider Electric.

Outre l'absence de câblage pour les éléments communiquant par liaison radiofréquence, ces dispositifs se caractérisent par une autonomie énergétique et donc une absence de maintenance pour le système de capteurs Homes, par la faible consommation des autres dispositifs et enfin par leur encombrement réduit et la facilité de leur installation.

Le *middleware* et l'interface graphique sur Smartphone permettent de répondre aux critères d'absence de configuration ou d'administration et de gestion de l'interopérabilité. Ils autorisent ainsi l'accès aux données hétérogènes provenant des différents capteurs et la commande des actionneurs (commerciaux et issus de la R&D), la prise en compte d'autres données,

notamment celles émanant du Web, la coordination des dispositifs en fonction de scénarios déterminés et la gestion dynamique du réseau de capteurs et d'actionneurs.

L'architecture de la plateforme @Home rend possible l'ajout aisé de nouveaux dispositifs, protocoles de communication et scénarios. Outre son extension, les perspectives de cette plateforme concernent son déploiement en conditions réalistes, pour identifier les besoins en capteurs et en actionneurs et les usages associés, lors de projets nationaux et européens.

Flux thermiques et évaluation de l'efficacité énergétique du bâtiment

Ce projet, fruit d'une collaboration entre le Liten [Département des technologies solaires (DTS) et Département des technologies des nanomatériaux (DTNM)] et le Leti [Laboratoire systèmes de capteurs multimodaux (LSCM)/DSIS], vise à adapter des fluxmètres thermiques aux contraintes du bâtiment et à exploiter la mesure des flux de chaleur dans le diagnostic énergétique des constructions.

La mesure de la température est fortement répandue dans le secteur de l'habitat. Cependant, alors que cette dernière est la conséquence/résultante d'un bilan d'échanges et de flux thermiques, la connaissance des coefficients de transfert **convectif** au niveau des parois reste très limitée, malgré d'importants efforts réalisés ces dernières années par la Communauté scientifique. Grâce à la mesure des flux de chaleur, il sera possible de réduire les incertitudes concernant les échanges à la paroi, de travailler sur la cause des changements de température et ainsi de les anticiper. De plus, un bâtiment est un système en permanente évolution, le régime stationnaire n'existe pas compte tenu des sollicitations journalières et saisonnières. La connaissance conjointe des flux thermiques et des températures donnera les moyens de s'affranchir plus facilement d'une partie de l'historique du bâtiment et de prédire plus fidèlement son comportement futur.

La mesure des flux thermiques permettra également l'élargissement des connaissances sur le comportement des parois à forte **inertie thermique** ou sur les apports solaires à travers les parois vitrées. En effet, l'efficacité de l'inertie thermique ne se limite pas à la capacité d'un matériau à conserver la température. Elle tient aussi à l'aptitude de ce matériau à stocker et déstocker de l'énergie, ce qui est directement lié à sa **conductivité**. En outre, la compréhension des échanges au niveau des parois autorisera le développement de modèles permettant de déterminer leurs constantes de temps⁽⁸⁾ et donc l'amortissement⁽⁹⁾ et le déphasage⁽¹⁰⁾, ouvrant ainsi la voie à la possibilité de définir la constante de temps à l'échelle d'une construction, au moment de sa conception. La maîtrise de ce paramètre conduira à l'élaboration de bâtiments autonomes en énergie pour le chauffage grâce à une gestion des apports solaires stockés et déstockés, la régulation étant alors assurée par le renouvellement d'air.

Un meilleur contrôle énergétique des bâtiments

En optimisant le contrôle des systèmes thermiques dans les constructions, il est possible non seulement d'économiser de l'énergie, mais aussi d'en réduire

(3) *Middleware*: logiciel tiers utilisé pour créer un réseau d'échange d'informations entre différentes applications informatiques.

(4) À ce sujet, voir *Clefs CEA* N° 60, Été 2011, p. 70.

(5) Lorsqu'un protocole de communication standard ne remplit pas les exigences de l'application visée, le Leti conçoit et développe des protocoles propriétaires. C'est le cas du réseau de capteurs de vibrations qui requiert une synchronisation fine des différents nœuds et des débits élevés.

(6) ZigBee: technologie de communication sans fil sur de courtes distances. ZigBee Green Power a élargi les possibilités de ZigBee en offrant une technologie pour les dispositifs fonctionnant grâce aux techniques de récupération d'énergie. L'énergie provenant de sources extérieures (solaire, éolienne, vibratoire, chimique, cinétique...) est récupérée puis convertie en électricité. Celle-ci est utilisée pour alimenter de petits dispositifs, qui ne nécessitent donc plus de batterie.

(7) Du nom du programme européen Habitat et bâtiment Optimisé pour la Maîtrise de l'Énergie et des Services, piloté par Schneider Electric et dont le CEA est partie prenante.

le coût d'exploitation. Le Laboratoire intelligence, modèles et apprentissage (Lima) du List a développé un logiciel qui répond à ce double défi.

Dans l'habitat, le chauffage, le rafraîchissement et la production d'eau chaude sont fournis par différents appareils. Leur fonctionnement est souvent complexe et interdépendant, d'autant plus qu'arrivent de nouvelles sources d'énergie ou de nouveaux systèmes, comme les capteurs solaires ou les pompes à chaleur. Pour répondre à cette problématique, le List a mis au point un logiciel qui assure le contrôle de ces divers appareils (figure 2). Installé dans l'habitat, ce logiciel optimise la consommation d'énergie globale, le coût d'exploitation et l'impact environnemental. Couplé à des simulations thermiques, il fournit un outil d'aide à la conception de contrôle-commande. Le logiciel s'appuie sur la modélisation du bâtiment sous la forme d'un système multi-agents et sur des techniques d'optimisation distribuée. L'optimisation prend en compte différents critères : les ressources énergétiques (électrique, solaire, éolien, gaz...), dont le prix et la disponibilité peuvent fluctuer au cours du temps, des données exogènes (informations météorologiques) pour prévoir les apports gratuits ou encore la prévision de la présence des habitants. En considérant l'ensemble de ces facteurs, l'optimisation du système assure le confort des occupants tout en permettant des économies d'énergie, donc de réduction des coûts (figure 3). L'approche est en outre conçue pour être totalement utilisable avec différents bâtiments, l'enjeu étant de répondre aux problématiques industrielles du développement des contrôles-commandes.

Réalisé en collaboration étroite avec le Laboratoire d'étude des systèmes thermiques (LETH) de l'Ines, le logiciel est en cours de test dans des environnements physiques réels. Lors de sa validation en simulation, il a aussitôt été possible d'effectuer des améliorations du confort de chauffage de plus de 40 % sur l'année, avec une très faible répercussion sur les coûts de fonctionnement et d'intégration. Au vu de ces résultats, certains industriels ont déjà manifesté leur intérêt. Le List travaille dès à présent à son extension pour l'adapter aux futures évolutions des systèmes énergétiques, en particulier par la prise en compte de prédictions exogènes afin d'affiner la planification du pilotage. Les prochaines étapes ? Intégrer dans l'approche les problématiques des réseaux électriques intelligents et des réseaux de chaleur pour qu'à partir des travaux menés sur des équipements, puis sur des bâtiments isolés, le passage à l'échelle d'un quartier devienne possible.

Perspectives d'avenir

Les enjeux à relever portent sur plusieurs aspects. L'intégration à l'extrême en usine des dispositifs de construction, avec des qualités de finition poussées au maximum, permettra des assemblages rapides avec un minimum de désagrément sur les chantiers (cas des tours de trente étages construites en 15 jours en Chine).

(8) Constante de temps : temps de réponse d'un matériau à un changement brusque de la température extérieure.

(9) Amortissement : absorption par une paroi d'une partie des variations thermiques. Il permet d'atténuer l'effet des canicules ou des grands froids.

(10) Déphasage : décalage dans le temps entre les pics de température à l'extérieur et à l'intérieur d'un bâtiment.

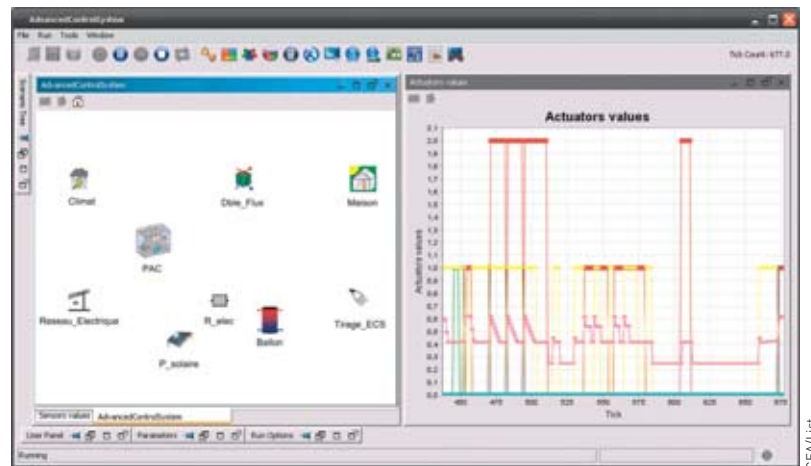


Figure 2.

Le logiciel de contrôle développé par le List. À gauche, les différents appareils contrôlés par le logiciel [pompe à chaleur PAC, résistances électriques R_{elec} , ballon pour la production d'eau chaude, tirage d'eau chaude sanitaire Tirage_ECS...], les ressources énergétiques [panneaux solaires...]. À droite, une représentation au cours du temps des valeurs affectées aux actionneurs du système [marche, arrêt...].

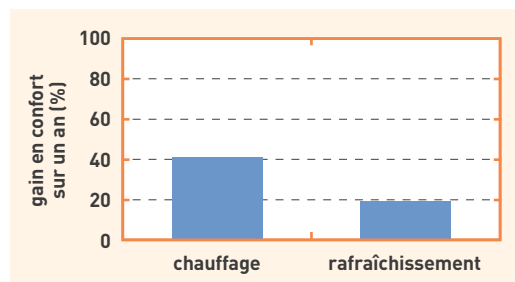


Figure 3.

Gains en confort cumulés sur un an introduits grâce au logiciel de contrôle développé par le List.

La conception d'un bâtiment autonome non seulement en énergie, mais aussi moins gourmand en eau et recyclant l'essentiel de ses déchets (*Autonomous Building Concept*[®] de Bouygues Construction) ainsi que celle de cités mutualisant la production, le stockage et la consommation de leurs bouquets énergétiques à l'aide des smart grids électriques et thermiques, figurent également au nombre des objectifs visés.

Enfin, il importe d'arriver à baisser les coûts de construction et de fonctionnement pour les nouvelles générations de bâtiments avec, à la clé, l'émergence de nouveaux modèles économiques, à l'instar de l'usage de la **batterie** pour les véhicules électriques.



Prototype d'un appareil multifonctions permettant d'assurer les fonctions de chauffage, rafraîchissement, ventilation et production d'eau chaude sanitaire. Haut d'environ 2 mètres et contenant une importante instrumentation, ce prototype a servi à valider l'algorithme de contrôle-commande. Il a été construit dans le cadre du projet AMMPERe (Appareil Multifonctions dédié aux Maisons Passives et utilisant les Énergies Renouvelables) par le CEA/Ines, le Groupe Atlantic et le Cetiat (Centre technique des industries aéronautiques et thermiques).

> Jean-Louis Six¹, Stéphanie Riché² et Frédéric Suard³

¹Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Grenoble (Site Ines)

²Institut Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble

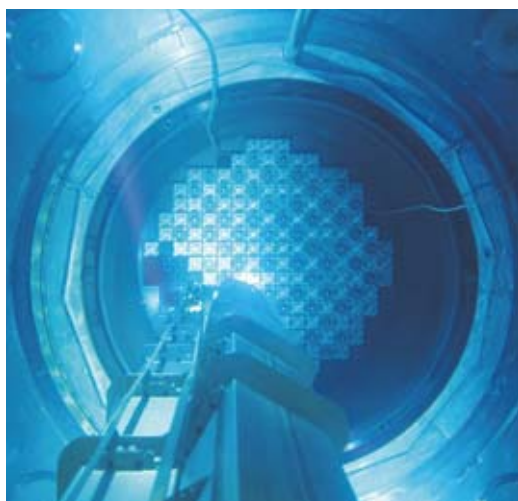
³Institut List (Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Saclay



Valoriser la chaleur du nucléaire pour des applications non électriques

Alors qu'une grande partie de l'énergie primaire est consommée dans le monde sous la forme de chaleur, celle générée par les réacteurs nucléaires n'est essentiellement utilisée que pour la production d'électricité. Pourtant, **la chaleur nucléaire offre de multiples opportunités, que ce soit dans les domaines du chauffage urbain, du dessalement de l'eau, de la synthèse de carburants liquides et d'hydrogène ou encore des applications industrielles.** Avec une production indépendante des énergies fossiles et sans émission de gaz à effet de serre, ses débouchés apparaissent porteurs de voies d'avenir.

Cœur d'un réacteur nucléaire. Outre son utilisation, aujourd'hui majoritaire, pour la production d'électricité, la chaleur générée par la fission dans le cœur des réacteurs pourrait couvrir une grande part des besoins en énergie thermique, sans faire appel aux ressources limitées en combustibles fossiles et sans émission de gaz à effet de serre.



Areva/C. Pauquet

En France, l'énergie nucléaire est presque exclusivement exploitée pour la production d'électricité. Pourtant, de multiples autres applications de cette énergie, tirant directement profit de la chaleur générée par **fission** dans le cœur du réacteur, sont

envisageables. Elles correspondent à trois domaines de températures associés à trois types de réacteurs. L'utilisation de la chaleur à basse température (inférieure à 250°C) peut être envisagée avec les **réacteurs à eau** actuels. Deux applications principales sont aujourd'hui mises en œuvre de par le monde : le chauffage urbain et le dessalement de l'eau de mer. La chaleur à température moyenne (entre 200°C et 500°C) est nécessaire pour générer la vapeur industrielle employée dans certains procédés de pétrochimie comme le **craquage d'hydrocarbures** ou l'extraction de sables bitumineux⁽¹⁾. Pour ces applications, la gamme de température des **réacteurs à neutrons rapides (RNR)** conviendrait parfaitement. Enfin, des réacteurs à haute température (supérieure à 500°C), voire à très haute température (supérieure à 800°C) sont requis pour la synthèse de carburants ou d'hydrogène (H₂).

Le dessalement de l'eau

L'eau douce est un élément indispensable à l'être humain, que ce soit pour l'alimentation ou pour l'hygiène. Dans certains pays, son approvisionnement est une question de survie et des régions du monde, de plus en plus nombreuses, sont en état de stress hydrique. La situation risque de se détériorer encore davantage sous l'effet combiné de l'accroissement de la population, de l'épuisement des nappes aquifères et du changement climatique. Un moyen de pallier ce manque d'eau douce réside dans le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres.

La décennie 2000-2010 a vu une augmentation fulgurante du nombre d'usines de dessalement dans le monde (+ 160 %), avec plus de 14 000 usines en fonctionnement générant un total de 70 millions de m³ d'eau douce par jour. Il y a fort à parier que la croissance va encore s'accélérer dans le futur.

Les technologies employées sont basées d'une part, sur l'évaporation de l'eau, par système multi-flash⁽²⁾ ou distillation avec ou sans compression de vapeur, et, d'autre part, sur la filtration par osmose inverse⁽³⁾. La distillation nécessite à la fois de la chaleur et de l'électricité alors que la séparation membranaire ne requiert que de l'électricité.



Ensemble de modules à osmose inverse (à droite) à l'usine de démonstration de dessalement nucléaire de Kalpakkam, en Inde. L'usine comprend un second système basé sur l'évaporation multi-flash. Ces installations, d'une capacité de production de 6,3 millions de litres d'eau douce par jour, sont couplées à deux **réacteurs à eau lourde sous pression (REL P)** d'une puissance de 170 MWe chacun.

Desalination Division/Bhabha Atomic Research Centre (BARC)

Le craquage des hydrocarbures

Une usine de raffinage de pétrole utilise de la chaleur industrielle pour ses procédés de distillation et pour le craquage des hydrocarbures. Pour ce faire, une proportion non négligeable (de 6 % à 12 %) du combustible produit est brûlée dans une unité de **cogénération** afin de porter de grandes quantités de vapeur d'eau à une température avoisinant les 350 °C. De plus, une fraction du **méthane** extrait est réemployée pour synthétiser l'hydrogène nécessaire à la désulfuration des essences. Ces importants besoins énergétiques de la raffinerie peuvent être avantageusement couverts grâce à un réacteur nucléaire dédié. À titre d'exemple, un seul RNR de 600 MWe suffirait à subvenir à l'ensemble des besoins en électricité, en chaleur et en hydrogène de l'usine Total Petrochemicals France de Gonfreville-l'Orcher en Normandie. Cela permettrait à l'opérateur non seulement d'obtenir près de 1,5 million de tonnes de carburants additionnels par an mais aussi, dans le même temps, de réduire ses émissions annuelles de gaz carbonique (CO₂) de 4 millions de tonnes.

L'extraction des huiles lourdes

Certaines régions du monde renferment des réserves très importantes de sables bitumineux. Par exemple, le potentiel des gisements en **bitume** de l'Alberta (Canada) est évalué à 1 700 milliards de barils⁽⁴⁾, soit l'équivalent de 50 ans de consommation mondiale. Malheureusement, ces hydrocarbures lourds sont très visqueux et difficiles à extraire. Une technique possible consiste à injecter de la vapeur d'eau chaude à 300 °C, sous haute pression, dans des puits creusés dans le sol, pour liquéfier les bitumes et les rendre extractibles. Cette extraction *in situ* permet la séparation du bitume et du sable dans le même réservoir. Le besoin en eau étant très important, il faut brûler une assez grande partie du pétrole extrait pour obtenir la quantité de vapeur d'eau nécessaire. Au final, le rendement énergétique se révèle assez mauvais – il peut être inférieur à 50 % – et les conséquences environnementales sont désastreuses : l'extraction d'un seul baril de pétrole génère plus de 80 kg de gaz à effet de serre (GES). Là encore, l'utilisation de la chaleur nucléaire peut grandement améliorer les rendements d'extraction et ce sans émissions de GES.

(1) Sables bitumineux : mélange de **bitume** brut, de sable, d'argile et d'eau.

(2) Système multi-flash : dans ce procédé, de la chaleur à basse température (70 °C en tête d'usine) est utilisée pour chauffer l'eau. Celle-ci est introduite dans une chambre à pression subatmosphérique dans laquelle se produit une vaporisation immédiate (flash). En effet, la température d'ébullition de l'eau diminue avec la pression. La vapeur d'eau est récupérée sur un condenseur. L'eau restante passe ensuite dans une 2^e chambre, soumise à une pression plus réduite. Un nouveau flash a lieu, une nouvelle condensation, puis passage dans une 3^e chambre à pression encore plus faible et ainsi de suite dans 7 à 10 chambres successives, voire plus.

(3) Osmose inverse : procédé de séparation consistant à pousser l'eau sous pression au travers d'une membrane semi-perméable qui retient le sel et autres impuretés.

(4) Baril : un baril de pétrole équivaut à 159 litres.

(5) Reformage : opération de craquage chimique d'une molécule d'hydrocarbure ou d'alcool pour la transformer en ses composants majeurs. Le reformage du méthane libère de l'hydrogène et du monoxyde de carbone.



Raffinerie et usine pétrochimique Total Petrochemicals France à Gonfreville-l'Orcher (Normandie). Les besoins énergétiques (électricité, chaleur et hydrogène) nécessaires au fonctionnement des installations du site pourraient être couverts par un seul RNR de 600 MWe.

La chaleur urbaine

Le chauffage urbain est l'un des débouchés les plus prometteurs du nucléaire industriel. Il pourrait se réaliser tout simplement par l'exploitation des réacteurs du parc actuel.

Pendant longtemps, l'éloignement géographique entre le lieu de production, la centrale nucléaire, et les usagers, concentrés dans les grandes villes, a été un frein au développement de cette application. Mais des réseaux de chauffages urbains se sont progressivement étendus et l'amélioration de la technologie des lignes de chaleur permet aujourd'hui le transport de cette chaleur sur de très longues distances, supérieures à 100 km, avec des pertes thermiques inférieures à 2 %. Ceci ouvre réellement la voie à la cogénération nucléaire à grande échelle. À titre d'exemple, les Finlandais ont récemment proposé d'alimenter la ville d'Helsinki en électricité et en chaleur en construisant une nouvelle centrale nucléaire sur le site de Loviisa, à 80 km de la capitale.



Canalisations pour le transport de la chaleur sur le site de cogénération de la Compagnie parisienne de chauffage urbain (CPCU) à Vitry-sur-Seine (Val-de-Marne). Le site produit à la fois de l'électricité (125 MWe) et de la vapeur (400 tonnes par heure), via une turbine fonctionnant au gaz naturel.

La production d'hydrogène

L'hydrogène peut être fabriqué industriellement selon trois procédés : par reformage⁽⁵⁾ de méthane, par **électrolyse** de l'eau ou par la mise en œuvre des cycles thermochimiques. D'autres techniques existent ou sont en phase d'études, telle la biosynthèse d'hydrogène à partir d'algues cultivées dans des bioréacteurs. La méthode la plus employée (à 96 %) et la moins chère est sans conteste la **réduction** de la vapeur



P. Avavian/CEA

Électrolyseur à haute température pour la production d'hydrogène. L'utilisation de la chaleur nucléaire dans le procédé d'électrolyse de l'eau permettrait d'améliorer son rendement énergétique et de réduire son coût.

d'eau à haute température par un hydrocarbure – le méthane en l'occurrence – en présence d'un **catalyseur**. L'électrolyse présente l'avantage de ne pas dégager de CO₂, mais elle s'obtient au prix d'un rendement énergétique plus faible et à un coût plus élevé. Selon les procédés, le rendement énergétique global varie entre 30 % et 65 %. Tous peuvent être assistés par un apport de la chaleur issue d'un réacteur nucléaire, avec à la clé un meilleur usage final du carbone et une réduction des émissions de CO₂. Lorsque l'hydrogène ainsi synthétisé est exploité comme vecteur énergétique dans les **piles à combustible** pour fournir de l'électricité, l'opération revient de fait à une conversion ou à un stockage d'électricité. Cependant, en sus du faible rendement et du coût élevé de sa production, les difficultés technologiques posées par le stockage de l'hydrogène (c'est un gaz de faible densité), son transport et sa distribution compromettent sérieusement, pour l'instant, cette conversion d'énergie à grande échelle.

La synthèse de biocarburants

La gazéification de substances carbonées (charbon, gaz, **biomasse**) génère un gaz de synthèse, mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène, qui peut servir pour l'élaboration de carburant liquide par **catalyse** chimique (procédé Fischer-Tropsch). Sont désignées par le terme générique XTL (*Coal To Liquid, Gas To Liquid* ou *Biomass To Liquid*), ces techniques qui consistent à fabriquer des carburants synthétiques. Le terme biocarburant est employé lorsque le composé organique de départ n'est pas **fossile**.

Deux filières d'agrocultures, carburants issus de la biomasse agricole, existent : la filière alcool, qui conduit à la synthèse de **bioéthanol** par fermentation de sucres provenant de plantes sucrières ou céréalières (canne à sucre, maïs, blé...), et la filière huile,

(6) Réaction du gaz à l'eau : réaction chimique conduisant à la synthèse de gaz carbonique et d'hydrogène à partir de monoxyde de carbone et d'eau.



P. Avavian/CEA

Lit fluidisé à haute température (LFHT), pour la production de gaz de synthèse à partir de biomasse, situé au Centre CEA de Grenoble. Un apport de chaleur nucléaire aiderait à effectuer la gazéification sans consommer d'hydrocarbures.

qui fournit du **biodiesel** par **transestérification** des lipides de plantes oléagineuses (tournesol, colza, palmier à huile...). La transformation de la lignine et de la **cellulose** des végétaux (bois, paille, déchets forestiers) en alcool ou en gaz de synthèse permet d'éviter le recours à des produits alimentaires pour l'élaboration de biocarburants.

L'apport du nucléaire à la production de biocarburants pourrait être double. D'une part, la chaleur d'un réacteur à haute température peut aider à réaliser les réactions de pyrolyse ou de gazéification sans brûler d'hydrocarbures, réduisant ainsi les émissions de CO₂. D'autre part, l'injection d'hydrogène additionnel dans le gaz de synthèse entraîne la réaction inverse de celle du gaz à l'eau⁽⁶⁾ (*Reverse Water Gas Shift*). En compensant le déficit en hydrogène du gaz de synthèse organique, on obtient le bon rapport H₂/CO (~2) compatible avec la molécule du carburant que l'on souhaite produire.

Des valorisations courantes mais méconnues

Outre la chaleur, de nombreuses autres applications non électrogènes de l'énergie nucléaire sont déjà communément usitées pour le bien public, sans que les populations en aient d'ailleurs vraiment conscience. Citons pêle-mêle le bénéfice tiré de la fabrication en réacteur de **radioisotopes** pour la médecine, que ce soit pour le diagnostic (imagerie) ou pour le traitement (oncologie), la propulsion navale (et peut-être dans le futur la propulsion spatiale) ou les générateurs thermoélectriques à radioisotopes, comme sources d'énergie des sondes spatiales éloignées du Soleil. Par ailleurs, grâce à la sensibilité des méthodes de détection de la **radioactivité**, les éléments radioactifs servent de plus en plus comme **traceurs** dans de multiples applications industrielles ou environnementales. Ils sont utilisés pour détecter des fuites, étudier le vieillissement des matériaux par érosion ou par corrosion, vérifier les soudures, déterminer la nature des sols ou la configuration des gisements. Le traçage par **radionucléides** est également une technique employée en hydrogéologie pour suivre le ruissellement et l'infiltration des eaux de surface, la dynamique des masses d'air ou les courants marins.

La cogénération nucléaire, une option d'avenir

Les réacteurs nucléaires assurent aujourd'hui une proportion importante (75 %) de la production électrique en France et contribuent déjà fortement à la réduction des émissions de GES. Dans le même temps, ils rejettent dans l'environnement de grandes quantités de chaleur inutilisées. Dans l'optique d'une meilleure gestion de l'énergie, il apparaît à présent techniquement possible de récupérer une partie de cette chaleur pour des usages non électriques tirant au maximum profit de l'énergie primaire fournie par la fission. Dans le futur, la cogénération nucléaire sera naturellement amenée à prendre de plus en plus d'importance.

➤ **Henri Safa**

Direction scientifique
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay

Institutions et organismes : qui fait quoi ?

Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) : agence d'objectifs finançant des recherches menées dans d'autres organismes et des développements techniques en régions. Établissement public à caractère industriel et commercial, elle agit principalement dans la recherche et la prospective, l'expertise et le conseil ainsi qu'en matière d'information et d'incitation.

AFHYPAC (Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible) : elle a pour objet la promotion des technologies relatives à l'hydrogène, de sa production à son utilisation, et aux piles à combustible.

AIE (Agence internationale de l'énergie) : agence autonome de l'OCDE qui œuvre pour la production d'une énergie propre, sûre et accessible pour ses 28 pays membres et pour les pays non membres.

AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique) : agence intergouvernementale qui, sous l'égide des Nations unies, œuvre pour l'utilisation pacifique du nucléaire et le respect du traité de non-prolifération.

Ancre (Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie) : créée le 17 juillet 2009, elle a pour mission de renforcer l'efficacité de la recherche française dans le domaine de l'énergie en favorisant les partenariats et les synergies entre les acteurs publics et privés du secteur. Au-delà de ses quatre membres fondateurs, le CEA, le **CNRS**, IFPEN (IFP Énergies nouvelles) et la CPU (Conférence des présidents d'université), l'Ancre réunit l'ensemble des organismes de recherche publics français concernés par les problématiques de l'énergie.

Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) : créée en 1979 et devenue un établissement public à caractère industriel et commercial par la **loi du 30 décembre 1991**, l'Andra est chargée de la gestion à long terme des déchets radioactifs produits en France. Dans le cadre de cette mission, elle met son expertise et son savoir-faire au service de l'État pour trouver, mettre en œuvre et garantir des solutions de gestion sûres pour l'ensemble des déchets radioactifs français afin de protéger les générations actuelles et futures du risque que présentent ces déchets.

ANR (Agence nationale de la recherche) : établissement public administratif (créé en 2005 sous forme d'un groupement d'intérêt public) chargé de financer des projets de recherche sélectionnés sur des critères de qualité scientifique et de pertinence économique.

Areva : groupe industriel français, créé en 2001 lors de la fusion de CEA-Industrie, Cogema et Framatome, chargé de la gestion de toutes activités industrielles et commerciales, notamment dans les domaines du nucléaire, des énergies renouvelables, de la transmission et de la distribution d'électricité. Parmi ses filiales, **Areva NP** (Nuclear Power) – ex-Framatome ANP – *leader* mondial dans le secteur nucléaire pour la conception et la construction des réacteurs, la fourniture de combustible et les services de maintenance et de modernisation ; **Areva TA** – ex-Technicatome – spécialisé dans la réalisation de réacteurs de recherche et de systèmes nucléaires de propulsion ; **Areva NC** (Nuclear Cycle) – ex-Cogema – qui couvre l'ensemble des services liés au cycle du combustible.

ASN (Autorité de sûreté nucléaire) : autorité administrative indépendante, elle est chargée du contrôle technique et réglementaire de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France. Elle assure ce contrôle au nom de l'État pour protéger le public, les travailleurs, les patients et l'environnement des risques liés aux activités nucléaires civiles, et contribue à l'information des citoyens.

ASND (Autorité de sûreté nucléaire de défense) : elle est chargée du contrôle technique et réglementaire de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France dans le domaine des installations et des activités nucléaires intéressant la défense.

CNRS (Centre national de la recherche scientifique) : établissement public à caractère scientifique et technologique exerçant son activité dans tous les domaines de la recherche (34 000 personnes, dont 25 500 personnels permanents).

Commission européenne : organe exécutif de l'Union européenne, elle gère la mise en œuvre des règlements et directives adoptés par le **Conseil**, peut saisir la Cour de justice et a le monopole de l'initiative législative. Elle dispose d'un large pouvoir de conduite des politiques communes, entre autres dans le domaine de la recherche et de la technologie, où elle a pour principal instrument le Programme cadre de recherche et de développement (PCRD).

Conseil européen : sommet des chefs d'États ou des chefs de gouvernement des 27 pays membres de l'Union européenne. Le Conseil européen définit les orientations et les priorités politiques générales de l'Union européenne. Il se réunit au moins deux fois par semestre.

CRE (Commission de régulation de l'énergie) : autorité administrative indépendante créée à l'occasion de l'ouverture à la concurrence des marchés de l'énergie. Par la loi du 10 février 2000, relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité, elle est chargée de veiller au bon fonctionnement des marchés de l'électricité et du gaz naturel en France, au bénéfice des consommateurs finaux et en cohérence avec les objectifs de la politique énergétique.

DoE (Department of Energy) : ministère américain de l'Énergie.

EDF : groupe *leader* de l'énergie, construit autour d'Électricité de France. Il est présent sur tous les métiers de l'électricité, de la production jusqu'au négoce et aux réseaux, ainsi que sur la chaîne du gaz naturel. Avec un réseau de filiales européennes et de sociétés implantées dans le monde, EDF fournit énergies et services à 37,7 millions de clients dans le monde.

ENSREG (European Nuclear Safety Regulators Group) : autorité indépendante créée en 2007 à l'initiative de la **Commission européenne**, l'ENSREG regroupe des experts des autorités de sûreté nucléaire des États membres de l'Union européenne ainsi que des représentants de la Commission européenne. Il joue le rôle de « conseil » des institutions européennes sur les questions relatives à la sûreté nucléaire et à la gestion des déchets radioactifs et du combustible usé.

EPIA (European Photovoltaic Industry Association) : organisation socio-professionnelle européenne de promotion de l'industrie photovoltaïque. Son siège est à Bruxelles.

ERDF (Électricité réseau distribution France) : filiale à 100 % d'EDF, ERDF est chargée de la gestion du réseau public de distribution d'électricité sur 95 % du territoire français continental. Elle assure l'exploitation, l'entretien et le développement de près de 1,3 million de km de réseau.

Euratom : Communauté européenne de l'énergie atomique créée en 1957 par le traité éponyme, elle a pour mission de contribuer au développement des activités nucléaires à des fins pacifiques et à leur contrôle dans les États membres de l'Union européenne.

Fondation MAScIR (Moroccan foundation for Advanced Science, Innovation and Research) : institution publique marocaine dont la mission est la promotion de la R&D dans les domaines de l'environnement, de l'énergie, de la santé et de la valorisation des ressources naturelles du Maroc.

Forum international Génération IV (GIF) : association intergouvernementale lancée en 2000 à l'initiative du **DoE**. Il regroupe à ce jour 13 membres (Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Chine, États-Unis, **Euratom**, France, Japon, Corée du Sud, Royaume-Uni, Russie, Suisse) qui mènent des recherches sur une nouvelle génération de systèmes nucléaires présentant des qualités d'économie, de sûreté améliorée, de minimisation des déchets et de résistance à la prolifération.

Foundation on Economic Trends (FOET) : organisation à but non lucratif créée en 1977 par les Américains Jeremy Rifkin et Ted Howard, la FOET s'intéresse à la prospective dans le domaine des



sciences et technologies, notamment aux niveaux des enjeux environnementaux, économiques et climatiques des politiques publiques des États-Unis et d'autres pays.

FUI (Fonds unique interministériel) : le FUI finance les projets de R&D collaboratifs des pôles de compétitivité. Il a pour vocation de soutenir des projets de recherche appliquée portant sur le développement de produits ou services susceptibles d'être mis sur le marché à court ou moyen terme.

Genoscope : créé en 1997, le Genoscope – Centre national de séquençage – forme depuis 2007, sur la Genopole d'Évry, avec le Centre national de génotypage (CNG), l'Institut de génomique, rattaché à la Direction des sciences du vivant du CEA. Ce grand équipement a pour mission le séquençage et l'analyse de l'information génétique à grande échelle de divers organismes d'intérêt scientifique, médical ou économique. Acteur déterminant dans le séquençage du génome humain, il s'intéresse aujourd'hui à la génomique environnementale.

Grenelle de l'environnement : ensemble de rencontres qui se sont déroulées en France de juillet à septembre 2007, réunissant l'État, les collectivités locales, les ONG, les employeurs et les salariés, afin de définir une feuille de route en faveur de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables. Elles ont été suivies d'une phase de consultation du public de fin septembre à mi-octobre. Les engagements pris lors du Grenelle de l'environnement sont déclinés dans les lois Grenelle 1, du 3 août 2009, et Grenelle 2, du 12 juillet 2010.

IBS (Institut de biologie structurale) : unité mixte de recherche CEA/Direction des sciences du vivant-CNRS-Université Joseph Fourier Grenoble 1, l'IBS a pour vocation le développement de recherches en biologie structurale et fonctionnelle des macromolécules biologiques, notamment les protéines.

ICSM (Institut de chimie séparative de Marcoule) : unité mixte de recherche CEA (Direction de l'énergie nucléaire et Direction des sciences de la matière)-CNRS-Université de Montpellier 2-ENSCM (École nationale supérieure de chimie de Montpellier). L'ICSM étudie, à l'échelle nanométrique, les interfaces en conditions extrêmes pour comprendre les mécanismes qui gouvernent les phénomènes de séparation dans les fluides complexes et les matériaux du nucléaire, dans un cadre de développement durable. Sa mission est de faire émerger des procédés et matériaux innovants dans le domaine de la chimie séparative, particulièrement pour le cycle des combustibles des réacteurs nucléaires de 4^e génération.

Ineris (Institut national de l'environnement industriel et des risques) : créé en 1990, l'Ineris est un établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Il intervient dans le domaine de la prévention des risques que les activités économiques font peser sur la santé, la sécurité des personnes et des biens, et sur l'environnement.

Ines (Institut national de l'énergie solaire) : l'Ines rassemble des équipes du CEA, du CNRS, de l'Université de Savoie et du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB). Ce centre de référence dans le domaine de l'énergie solaire, établi avec le soutien du Conseil général de la Savoie et de la Région Rhône-Alpes, est situé à Savoie Technolac sur les rives du lac du Bourget.

Institut des Matériaux Jean Rouxel : cette unité mixte CNRS-Université de Nantes est active sur l'élaboration, la caractérisation physique et la modélisation des matériaux. Elle rassemble chimistes, physiciens et spécialistes des plasmas et couches minces.

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) : expérience scientifique à très grande échelle visant à démontrer, à partir de 2026, la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion par confinement magnétique. ITER, qui est en cours de construction, est implanté en lisière du centre CEA de Cadarache (Bouches-du-Rhône). Pendant sa phase d'exploitation, ce tokamak testera les technologies fondamentales pour passer à

l'étape suivante : un réacteur de fusion de démonstration capable de produire de l'énergie à des fins commerciales.

Loi du 30 décembre 1991 : appelée aussi « Loi Bataille », du nom de son rapporteur, cette loi a encadré en France pendant 15 ans les recherches sur la gestion des déchets radioactifs à vie longue de haute ou de moyenne activité selon trois axes (séparation-transmutation, stockage et entreposage). Elle a été incluse en 2000 dans le Code de l'Environnement (article L 542).

Loi du 28 juin 2006 : loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs en France. Elle organise la poursuite des recherches sur la gestion des déchets radioactifs à vie longue de haute ou de moyenne activité avec pour jalons : après une évaluation des perspectives industrielles des filières de séparation-transmutation réalisée en 2012, mettre en exploitation un prototype avant fin 2020, choisir un site de stockage réversible en couche géologique profonde en vue d'une mise en exploitation en 2025 et créer, au plus tard en 2015, de nouvelles installations d'entreposage.

MINATEC : basé à Grenoble, MINATEC est le premier campus européen d'innovation en micro- et nanotechnologies. Grâce à une puissante dynamique de travail collaboratif, il regroupe 2 400 chercheurs, 1 200 étudiants et 600 industriels et spécialistes du transfert technologique, regroupés sur 20 hectares et disposant d'infrastructures exceptionnelles.

OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) : regroupant 34 pays parmi les plus industrialisés, elle a pour objectif de promouvoir des politiques visant à réaliser la plus forte expansion possible de l'économie, de l'emploi et du niveau de vie dans les pays membres, tout en maintenant la stabilité financière, et de contribuer ainsi au développement de l'ensemble de l'économie et du commerce mondiaux sur une base multilatérale.

Paquet Énergie-Climat : plan d'action de l'Union européenne (UE), présenté en janvier 2008 par la Commission européenne et adopté en décembre 2008, visant à mettre en place une politique commune de l'énergie et à lutter contre le changement climatique. Il a fixé trois objectifs à atteindre d'ici à 2020 par l'UE (3x20) : réduire de 20 % les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux niveaux de 1990, améliorer de 20 % l'efficacité énergétique et porter à 20 % la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique.

Programme d'investissements d'avenir (PIA) : financé par le grand emprunt national lancé en 2010 sur les marchés financiers, et doté de 35 milliards d'euros, il vise à moderniser et renforcer la compétitivité de la France, en favorisant l'investissement et l'innovation dans cinq secteurs prioritaires : l'enseignement supérieur et la formation, la recherche, les filières industrielles et les PME, le développement durable et le numérique.

Réseau national de recherche et technologie sur les batteries : créé en 2010, ce réseau réunit recherche publique – CEA, CNRS, universités, IFPEN (IFP Énergies nouvelles), Ineris, Inrets devenu IFSTTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux) – et industriels. Il s'appuie sur un centre de recherche en amont, coordonné par le CNRS, qui a pour mission d'explorer les nouveaux concepts de batteries et les matériaux à hautes performances, et un centre de recherche technologique, piloté par le CEA, où sont testés et validés ces nouveaux concepts.

Rosatom : créé en 2004, Rosatom (agence fédérale russe de l'énergie atomique) est devenu, fin 2007, une société d'État qui rassemble toutes les activités nucléaires du pays (recherche, construction et exploitation de centrales, cycle du combustible, gestion des déchets...).

RTE (Réseau de transport d'électricité) : filiale à 100 % d'EDF, RTE est le gestionnaire du réseau de transport d'électricité français. Cette entreprise de service public a pour mission l'exploitation, la maintenance et le développement du réseau haute et très haute tension.

Glossaire

A

absorption/désorption solide : phénomènes d'échanges entre une phase gazeuse et une phase solide, se traduisant par l'établissement/la rupture de liaisons entre les molécules ou atomes constituant le gaz et le substrat. Les molécules ou atomes de gaz pénètrent le matériau.

accumulateur : dispositif de stockage de l'énergie électrique sous forme chimique. Il est basé sur un système électrochimique réversible, c'est-à-dire qu'il est rechargeable.

acide aminé : molécule organique constituant de base des **protéines** contenant un groupement amine (NH_2) et un groupement carboxylique (COOH). Dans un **acide α -aminé**, le groupement amine et le groupement carboxylique sont liés au même atome de carbone.

actinides : **radioéléments** naturels et/ou artificiels de **numéro atomique** compris entre 89 (actinium) et 103 (lawrencium) ; **actinides majeurs** : noyaux lourds d'**uranium** et de **plutonium** présents ou formés dans le **combustible** nucléaire ; **actinides mineurs** : noyaux lourds formés en relativement faibles quantités dans un réacteur par captures successives de neutrons par des noyaux du combustible. Ce sont principalement le neptunium, l'américium et le curium.

activation : processus par lequel certains **nucléides** initialement stables, en particulier au sein des matériaux de structure des réacteurs et des éléments **combustibles**, sont rendus **radioactifs** par bombardement par des neutrons (activation neutronique) ou d'autres particules.

activité : nombre de **désintégrations** par unité de temps au sein d'un **radionucléide** ou d'un mélange de radionucléides, exprimé en **becquerel (Bq)**. La haute activité atteint plusieurs milliards de becquerels par gramme.

adiabatique : se dit des transformations qui s'effectuent sans échange de chaleur avec l'extérieur.

ADN : acide désoxyribonucléique, support de l'information **génétique** au sein de la cellule vivante.

adsorption : fixation d'atomes ou d'une phase vapeur ou liquide à la surface d'un milieu solide.

alcalino-terreux (métaux) : métaux appartenant au groupe IIA (colonne 2) de la classification périodique des éléments (béryllium, magnésium, calcium, strontium, baryum et radium).

alcalins (métaux) : métaux appartenant au groupe IA (colonne 1) de la classification périodique des éléments (lithium, sodium, potassium, rubidium, césium et francium).

alcane : **hydrocarbures** saturés de formules brutes $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ pour les non cycliques (linéaires ou ramifiés) et C_nH_{2n} pour les cycliques. Le **n-hexane** est un alcane non cyclique de formule C_6H_{14} .

algorithme : enchaînement des opérations logico-mathématiques nécessaires à l'accomplissement d'un calcul.

algues vraies : elles résultent de l'inclusion d'une **cyanobactérie** ancestrale à l'intérieur d'une cellule eucaryote primitive (**endosymbiose primaire**). Ces algues, dont le patrimoine **génétique** est contenu dans un noyau (eucaryotes), regroupent les algues rouges, les glaucocystophytes et les algues vertes. Plusieurs possèdent des flagelles qui leur permettent de se déplacer. Certaines algues vertes sont à l'origine des plantes terrestres.

anaérobie : qui se développe ou fonctionne en l'absence totale d'oxygène.

angström (Å) : $1 \text{ Å} = 10^{-10}$ mètre.

assemblage (combustible) : ensemble d'éléments **combustibles** chargé d'un seul tenant dans un réacteur nucléaire.

autodécharge (d'un accumulateur) : le taux d'autodécharge d'un **accumulateur** correspond à la perte moyenne relative de la charge stockée, en dehors de toute utilisation, par mois et pour une température donnée, généralement 20°C .

B

bactérie : microorganisme vivant, généralement unicellulaire, sans noyau (procaryote) et se multipliant rapidement, mesurant typiquement entre 0,2 et 2 **micromètres**.

bar : unité de pression ; $1 \text{ bar} = 10^5$ **pascals** (unité légale **Pa**).

bascules synchrones (flip-flops) : éléments de mémorisation distribués dans un circuit intégré, les *flip-flops* permettent de synchroniser le circuit sur une horloge et contiennent toutes les données actives du calcul à un moment donné. Elles sont typiquement constituées de deux cellules SRAM (*Static Random-Access Memory*, mémoire volatile, extrêmement rapide et peu dense) et sont volatiles (elles nécessitent une alimentation électrique pour conserver l'information).

batterie : assemblage d'**accumulateurs** (cellules élémentaires). Les assemblages d'accumulateurs peuvent être aussi appelés **modules**, lorsque la tension unitaire est dans la gamme TBTS (Très Basse Tension de Sécurité < 50V). Les **packs batteries** installés dans les véhicules électriques sont constitués d'un assemblage de modules.

becquerel (Bq) : du nom du physicien français Henri Becquerel. Unité de mesure de l'**activité** nucléaire ($1 \text{ Bq} = 1$ désintégration de noyau atomique par seconde).

biodiesel : **diesel** obtenu à partir de **biomasse** végétale (plantes oléagineuses de grande culture [1^{ère} génération], résidus forestiers, déchets agricoles [2^e génération], microalgues [3^e génération]).

bioéthanol : **éthanol** obtenu à partir de plantes sucrières (betterave, canne à sucre...) ou céréalières (blé, maïs...) [bioéthanol de 1^{ère} génération], à partir de résidus forestiers et de déchets agricoles [bioéthanol de 2^e génération], à partir de microalgues ou **cyanobactéries** [bioéthanol de 3^e génération].

biokérosène : **kérosène** obtenu à partir de **biomasse**.

biomasse : masse de matière vivante, végétale à plus de 99 %, présente à la surface de la Terre.

bitume : matière organique naturelle ou issue de la distillation du pétrole, constituée d'un mélange d'**hydrocarbures**, très visqueuse, voire solide, à température ambiante, de couleur noire. Il entre dans la composition de l'asphalte.

boîte quantique : composant de dimension **nanométrique** dans lequel chaque électron n'a plus aucun degré de liberté, contraint par un **semi-conducteur** de plus grande **bande interdite**.

breakeven (point de) : point d'équilibre énergétique du **plasma**, où la puissance produite par les réactions de **fusion** au sein du plasma est égale à la puissance injectée pour entretenir la configuration et chauffer le plasma.



C

caloporteur : fluide (gaz ou liquide) utilisé pour extraire la chaleur produite par les **fissions** dans un réacteur nucléaire.

capacité (d'une batterie) : quantité d'électricité stockée : **charge** stockée. Elle est exprimée en **ampère-heure (A·h)**.

catalyse : processus impliquant une substance (**catalyseur**) capable d'accélérer une réaction chimique. En principe, le catalyseur n'est pas consommé et est restitué en fin de la réaction.

cathode (d'un téléviseur) : dans un tube cathodique, la cathode est l'**électrode** qui, chauffée, émet des électrons. Ceux-ci sont ensuite accélérés par le champ électrique existant entre cette cathode et l'anode. Ils viennent frapper l'écran, sur lequel est déposée une couche électroluminescente réagissant au choc des électrons, en créant un point lumineux.

cellule (photovoltaïque) : unité de base qui permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau **semi-conducteur** de charges électriques positives et négatives.

cellulose : constituant principal de la paroi des cellules végétales. Il s'agit d'un **polymère** linéaire de formule $(C_6H_{10}O_5)_n$ formé d'unités de glucose.

charge électrique (d'une batterie) : quantité d'électricité que peut faire circuler une **batterie** lors de son utilisation. Elle se mesure en **ampère-heure (A·h)**.

coefficient de vidange ou de vide : coefficient qui traduit la variation du facteur de multiplication (rapport, pour un intervalle de temps donné, du nombre de neutrons produits par **fission** au nombre de neutrons disparus) d'un réacteur lorsque le **caloporteur** forme plus de vides (comme des bulles) que la normale. Si ce coefficient est positif, un excès se traduira par une augmentation de la **réactivité** et de la puissance. S'il est négatif, cet effet tendra à arrêter le réacteur. Le coefficient de vide a pour unité le dollar ou le pcm.

cogénération : utilisation de l'énergie thermique d'une chaudière (par exemple un réacteur nucléaire) pour plusieurs applications, comme la production simultanée d'électricité et de chaleur.

combustible (nucléaire) : matière **fissile** qui permet d'assurer par une géométrie adaptée l'entretien d'une **réaction en chaîne** dans le cœur d'un réacteur ; **combustible usé** : combustible qui, ne permettant plus d'entretenir la réaction nucléaire, est déchargé du réacteur.

complexe : édifice constitué par un ion métallique central auquel se lient d'autres ions ou molécules, appelés **ligands**.

conditionnement (des déchets radioactifs) : ensemble des opérations successives à réaliser pour mettre le **déchet** sous une forme stable, sûre, et qui permette sa gestion ultérieure, qu'il s'agisse d'**entreposage**, de **transmutation** ou de **stockage**. Ces opérations peuvent comprendre notamment le compactage, l'enrobage, la fusion, la **vitrification**, la mise en conteneur.

conductivité thermique : caractérise la capacité d'un matériau à conduire la chaleur.

convection : ensemble des mouvements générés dans un fluide du fait des différences de densité et de température en divers endroits. La **convection naturelle** est le transport automatique de la chaleur par cette circulation, la **convection forcée** fait intervenir des mécanismes, comme des pompes.

coordination : liaisons qu'un ion établit avec des atomes donneurs d'électrons. Le **nombre de coordination** est le nombre de liaisons qu'un ion est capable d'établir avec de tels atomes.

craquage ou cracking : modification de la structure moléculaire d'un **hydrocarbure** sous l'effet de la chaleur, de la pression et parfois d'un **catalyseur**.

cryogénique : littéralement « produisant du froid » ; par extension : « en rapport avec les basses températures » (les liquides cryogéniques ont des points d'ébullition inférieurs à -150°C).

CVD (Chemical Vapor Deposition, dépôt chimique en phase vapeur) : méthode de préparation de couches (épaisseurs pouvant varier de quelques dizaines de **nanomètres** à une centaine de **micromètres**) par dépôt en phase vapeur formé par réaction chimique à partir d'un milieu gazeux de composition différente.

cyanobactéries (du grec kuanos, bleu sombre) : bactéries capables de transformer l'énergie lumineuse par **photosynthèse** oxygénique (de la même manière que les plantes). Les cyanobactéries vivent aujourd'hui un peu partout, dans les océans, les eaux douces et aussi sur la terre.

cyclabilité : exprimée en nombre de **cycles**, elle caractérise le nombre de fois qu'un générateur électrochimique peut restituer une **charge** supérieure à un seuil défini (généralement 80 % de la **capacité** initiale). Elle dépend fortement du type de sollicitations et du positionnement de ce seuil.

cyclage : alternance de charge et de décharge.

cycle (d'une batterie) : il correspond à la succession d'une charge et d'une décharge.

cycle d'irradiation (en réacteur) : période de fonctionnement d'un réacteur nucléaire entre deux rechargements successifs (partiels ou non) de **combustible**.

cycle fermé (du combustible) : le cycle est dit « fermé » lorsque le **combustible usé** est **traité** à des fins de **recyclage**, « ouvert » dans le cas contraire.

D

déchet radioactif : substance **radioactive** pour laquelle aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée. Les **déchets radioactifs ultimes** sont des déchets radioactifs qui ne peuvent plus être **traités** dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux.

décroissance radioactive : diminution au cours du temps de l'**activité** d'une substance **radioactive** par **désintégration radioactive** de ses noyaux constituants.

démixtion : phénomène de micro-séparation de phases de compositions différentes dans un mélange ou un alliage lorsqu'un composé en solution du mélange a dépassé sa limite de solubilité.

densité de courant : dans une **batterie** ou dans une supercapacité, courant délivré par unité de surface d'**électrode** (A/cm^2).

densités d'énergie massique ou volumique : elles correspondent respectivement à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (**Wh/kg**) ou de volume (**Wh/L**) d'un **accumulateur** ou d'une supercapacité.

densités de puissance massique ou volumique : énergie par unité de temps (puissance) que peut **délivrer** l'unité de masse (**W/kg**) ou de volume (**W/L**) d'un **accumulateur** ou d'une super-capacité.

désintégration radioactive : processus par lequel un noyau ou une particule se décompose en plusieurs fragments (particules et noyaux, qui constituent les *produits de désintégration*, photons) pour atteindre un état de plus basse énergie, donc plus stable, les caractéristiques de cette transformation ne dépendant que de l'état du noyau (de la particule) de départ et non du processus qui l'a produit.

deutérium (D) : un des deux **isotopes** « lourds » de l'hydrogène. Son noyau comporte un proton et un neutron.

diesel (ou gazole) : carburant liquide incolore à jaune, issu du raffinage du pétrole. Il est pratiquement insoluble dans l'eau et sa température d'auto-inflammation atteint 220 °C.

diméthyl-éther (DME) : composé chimique de formule $\text{CH}_3\text{—O—CH}_3$ se présentant à l'état liquide à 20 °C sous une pression de 5,3 bars.

diode électroluminescente (DEL) : composant opto-électronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique : l'émission d'un photon est liée à la recombinaison d'un électron et d'un trou dans un **semi-conducteur**. Le processus élémentaire associé est inverse de celui en œuvre dans une **cellule photovoltaïque**.

domotique : champ de recherche défini par un ensemble de technologies de l'électronique, de l'information et des télécommunications utilisées dans les bâtiments du domaine tertiaire et résidentiel. Ces technologies ont pour but d'améliorer la vie des occupants d'une maison en augmentant le confort et en facilitant la gestion de la consommation d'énergie au sein du bâtiment.

E

effet falaise : désigne en matière de sûreté nucléaire l'altération brutale du comportement d'une installation, que suffit à provoquer une légère modification du scénario envisagé pour un accident dont les conséquences sont alors fortement aggravées.

effet Joule : dégagement de chaleur lié à la résistance d'un conducteur au passage du courant électrique.

électrode : élément conducteur remplissant des fonctions d'émission, de capture ou de guidage, par un champ électrique, des électrons ou des ions. Placées dans un milieu (**électrolyte**...), les électrodes se divisent en **cathodes** et en **anodes** selon qu'elles fournissent des électrons au milieu extérieur ou bien qu'elles en reçoivent. L'anode est le siège d'une réaction électrochimique d'**oxydation**, tandis que la cathode est le siège d'une réaction électrochimique de **réduction**. Dans une pile ou dans un **accumulateur**, on distingue l'électrode positive et l'électrode négative.

électrolyse : utilisation de courant électrique passant au travers d'un **électrolyte** placé entre deux **électrodes** pour effectuer une réaction chimique. Dans le cas spécifique de l'électrolyse de l'eau, le courant électrique décompose l'eau en oxygène et en hydrogène qui se dégagent aux deux électrodes.

électrolyseur : dispositif électrochimique permettant de réaliser une **électrolyse**, par exemple celle de l'eau par l'utilisation d'un courant électrique qui décompose l'eau en oxygène et en hydrogène.

électrolyte : milieu liquide ou solide permettant la conduction du courant électrique *via* le déplacement des ions qu'il contient.

énergie délivrée (d'un accumulateur) : exprimée en **watt-heure (Wh)**, elle correspond au produit du courant (en ampère A) et de la tension (en volt V) intégré sur la durée de la décharge (en heure h).

enrichissement : processus d'accroissement de la teneur d'un élément en l'un de ses **isotopes**.

entreposage (de déchets radioactifs) : opération consistant à placer les **déchets radioactifs** à titre temporaire dans une installation spécialement aménagée à cet effet, en surface ou à faible profondeur, dans l'attente de les récupérer. Ce terme désigne aussi l'installation dans laquelle les déchets sont placés, avec le projet de les reprendre ultérieurement (voir aussi **stockage**).

entropie : quantité, exprimée en joule par kelvin, dont le changement est égal à la chaleur apportée à un système par un processus réversible et à température constante divisée par cette température. L'entropie mesure le degré de désordre d'un système.

enzyme : molécule permettant d'abaisser l'énergie d'activation d'une réaction et d'accélérer jusqu'à des millions de fois les réactions chimiques du **métabolisme** se déroulant dans le milieu cellulaire ou extracellulaire sans modifier l'équilibre formé ; ces **protéines** sont les **catalyseurs** du monde vivant.

EPR : réacteur à eau sous pression (REP) de troisième génération, développé par Areva NP, conçu pour présenter un niveau de sûreté, de durabilité, de performance et de compétitivité optimal.

éthanol : alcool de formule chimique $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ dérivé de l'éthane (C_2H_6), un **hydrocarbure** gazeux.

F

fertile : qualifie un **nucléide** dont le noyau peut être transformé, directement ou indirectement, en un noyau **fissile**, par capture de neutrons.

fibre de carbone : matériau composé de fibres extrêmement fines (de 5 à 15 **microns** de diamètre), constitué majoritairement d'atomes de carbone. Ceux-ci sont agglomérés dans des cristaux microscopiques alignés plus ou moins parallèlement à l'axe long de la fibre, ce qui la rend très résistante. Plusieurs milliers de fibres sont enroulées ensemble pour former un fil qui peut être utilisé tel quel ou tissé.

fissile : se dit d'un **nucléide** dont le noyau est susceptible de subir une **fission** par absorption de neutrons. En toute rigueur, ce n'est pas le noyau appelé fissile qui subit la fission mais le noyau composé formé suite à la capture d'un neutron.

fission : éclatement d'un noyau lourd, généralement en deux morceaux, accompagné d'émission de neutrons, de rayonnements et d'un important dégagement de chaleur.

force ionique : somme des concentrations de toutes les espèces ioniques présentes dans une solution.

formaldéhyde : de formule chimique CH_2O , il se présente sous forme de gaz à la température ambiante. Il est très soluble dans l'eau (la solution est appelée formol). Il est présent dans de nombreux produits comme les peintures, les papiers peints, les



détergents, les colles, les assouplissants, les adhésifs, les feux de forêts, les fumées de tabac. Il est même produit en petites quantités par le corps humain. Il est classé comme «cancérogène certain», à l'origine de cancers du nasopharynx.

fossile : combustible hydrocarboné, comme le charbon, le pétrole ou le gaz naturel, provenant de gisements formés par l'accumulation et la transformation de matière organique. Qualifie aussi les énergies qui en sont tirées.

fusion par confinement inertiel : ce procédé repose sur l'utilisation de lasers de puissance pour comprimer et chauffer des microballons contenant un mélange deutérium-tritium, les amenant ainsi dans des conditions de densité et de température propres au démarrage et à l'entretien des réactions de fusion thermonucléaire.

fusion par confinement magnétique : voir tokamak.

fusion thermonucléaire : réaction par laquelle de petits noyaux atomiques se combinent à haute température pour former de plus gros noyaux possédant une masse plus faible que la somme des masses des premiers, la différence étant convertie en énergie selon la loi d'équivalence d'Einstein $E = mc^2$. La réaction la plus étudiée est la fusion du deutérium et du tritium, qui en fusionnant vont former un noyau d'hélium et émettre un neutron très énergétique.

G

gaz de schiste : gaz d'origine naturelle, issu de la décomposition de l'argile riche en matières organiques des schistes argileux. Piégé dans les roches poreuses, pour l'exploiter il est nécessaire de détruire la structure des roches, par fracturation hydraulique. Cette technique consiste à provoquer un grand nombre de micro-fractures dans la roche, en injectant de l'eau à haute pression, ce qui permet au gaz de se déplacer jusqu'à un puits pour être récupéré en surface.

gène : séquence d'ADN sur un chromosome constituant une unité d'information héréditaire qui permet la réalisation d'un caractère phénotypique (caractère apparent d'un individu) via la production d'une ou de plusieurs protéines.

génome : ensemble du matériel génétique d'un organisme vivant.

H

héliostat : miroir plan et mobile. Il suit la course du soleil et concentre les rayons solaires vers un point unique.

hydrocarbure : molécule composée uniquement de carbone et d'hydrogène (molécule hydrocarbonée).

hydrocraquage : procédé qui consiste à casser une molécule organique complexe (par exemple une longue chaîne carbonée) en molécules plus petites (diesel, kérosène, naphta) sous l'effet de la chaleur, de la pression et en injectant de l'hydrogène pour «hydrogéner» les molécules insaturées. Cette opération se fait en présence d'un catalyseur.

hydrolyse : décomposition d'une espèce chimique (molécule ou ion) par l'eau. Par exemple, la décomposition d'une solution aqueuse de borohydrure de sodium produit de l'hydrogène selon la réaction suivante : $\text{NaBH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaBO}_2 + 4\text{H}_2$.

hydrométallurgiques (procédés) : dans le traitement des combustibles usés, la voie hydrométallurgique implique leur mise en solution en milieu acide et la mise en œuvre de procédés d'extraction liquide-liquide.

hydrophobe : qui repousse l'eau.

hyperbare (stockage) : à une pression très supérieure à la pression atmosphérique.

I

ignition : auto-entretien de la température du plasma au sein d'une machine de fusion thermonucléaire à un niveau suffisant pour que les réactions se poursuivent en continu.

inertie thermique : résistance d'un matériau au changement de sa température. Elle dépend de sa capacité à stocker et déstocker de la chaleur dans sa structure.

isotopes : formes d'un même élément chimique dont les noyaux possèdent un nombre de protons identique (ainsi qu'un nombre identique d'électrons gravitant autour du noyau) mais un nombre de neutrons différent.

J

jonction p-n : voir simple jonction.

jonction tunnel magnétique : nanostructure constituée de deux couches minces magnétiques séparées par une barrière tunnel (une mince couche d'oxyde). Sa résistance électrique dépend des directions relatives des aimantations des deux couches minces. L'usage de tels éléments dans une bascule synchrone (flip-flop) la rend non volatile : l'aimantation des couches minces subsiste hors alimentation électrique. Il est alors possible de couper l'alimentation du circuit lorsque celui-ci est inactif, sans perdre l'information.

K

kérosène : mélange d'hydrocarbures contenant des alcanes ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) de formule chimique allant de $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ à $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$. Il est essentiellement utilisé dans la fabrication de carburant pour l'aviation.

L

lanthanides : famille des éléments de numéro atomique compris entre 57 (lanthane) et 71 (lutécium).

levure : champignon microscopique unicellulaire, représentatif des cellules vivantes possédant un noyau, et utilisé à ce titre comme modèle par les biologistes. Les levures sont aussi employées dans l'industrie agro-alimentaire (fabrication du pain, de la bière, du vin).

liaison covalente : liaison établie lorsque deux atomes, pour saturer leur dernière orbite, se partagent une ou plusieurs paires d'électrons. En général, les liaisons covalentes sont les plus fortes et les plus stables.

liaison de van der Waals : interaction électrique de faible intensité entre atomes, molécules, ou entre une molécule et un cristal.

liaison ionique : liaison se caractérisant par le transfert d'électrons d'un atome vers un autre, mais sans partage comme dans une liaison covalente.

liaison métallique : liaison chimique qui permet la cohésion des atomes d'un métal. Elle concerne un très grand nombre d'atomes (typiquement plusieurs millions) qui mettent en commun des électrons libres assurant la conduction électrique au sein d'un objet métallique.

liaisons supramoléculaires : interactions non covalentes ou faibles entre atomes au sein d'une molécule ou entre molécules au sein d'un même édifice.

ligand : molécule organique pouvant se fixer par une liaison dite de coordination à un ion au sein d'un complexe de coordination.

M

métabolisme : ensemble des transformations moléculaires et énergétiques qui se déroulent de manière ininterrompue dans la cellule ou l'organisme vivant.

métaux de transition : famille des 38 éléments de numéros atomiques 21 à 30, 39 à 48, 72 à 80 et 104 à 112, parmi lesquels le titane, le manganèse, le fer, le cobalt, le nickel, le chrome, le platine...

métaux nobles : historiquement, métaux précieux inaltérables à l'air ou à l'eau (argent, or, platine) utilisés en orfèvrerie. Ce terme s'applique maintenant aux autres métaux qui présentent une faible abondance dans la croûte terrestre et sont donc à la fois rares et coûteux (palladium, rhodium, iridium, osmium et ruthénium).

méthane : hydrocarbure de formule brute CH_4 , le méthane est le composant principal du gaz naturel et du biogaz issu de la fermentation de matières organiques animales ou végétales. Il se dégage naturellement des zones humides peu oxygénées comme les marais et les terres inondées. Il se forme aussi dans les panses des ruminants.

micro : préfixe μ du millionième (10^{-6}). 1 micromètre (μm) ou micron = 10^{-6} mètre.

module ou panneau (photovoltaïque) : générateur électrique de courant continu, constitué d'un assemblage de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement.

Mtep : million de tonnes d'équivalent pétrole. 1 tep = 42 milliards de joules ou 11 630 kWh.

mutation (génétique) : altération transmissible du message génétique par modification d'une séquence de nucléotides de l'ADN.

N

nano : préfixe n du milliardième (10^{-9}) ; 1 nanomètre (nm) = 10^{-9} mètre.

naphta : liquide transparent issu de la distillation du pétrole. Selon l'intervalle de température de distillation, on distingue le naphta léger et le naphta lourd. Le léger sert entre autres de base dans la composition des essences. Du naphta de synthèse peut être obtenu à partir de déchets forestiers et de résidus agricoles.

neutrons rapides : neutrons libérés lors de la fission, se déplaçant à très grande vitesse (20 000 km/s). Leur énergie est de l'ordre de 2 MeV.

neutrons thermiques : également appelés neutrons lents (ou thermalisés), neutrons en équilibre thermique avec la matière dans

laquelle ils se déplacent à une vitesse de l'ordre de 2 à 3 km/s. Leur énergie est inférieure à 1 eV.

normo-mètre cube : 1 normo-mètre cube de gaz (Nm^3) est un mètre cube pris à 0 °C sous la pression de 101 325 Pa (1 atmosphère).

nucléide : espèce nucléaire caractérisée par son nombre de protons Z (numéro atomique), son nombre de neutrons N et par son nombre de masse A , égal à la somme du nombre de protons et du nombre de neutrons ($A = Z + N$).

nucléotide : chaînon élémentaire des acides nucléiques (ADN et acide ribonucléique ARN), constitué d'une base purique (adénine, guanine par exemple) ou pyrimidique (cytosine, thymine par exemple), d'un sucre et d'un ou plusieurs groupements phosphate.

numéro atomique : nombre de protons du noyau d'un élément.

nutraceutique : substance active présente à l'état naturel dans un aliment et qui a un effet bénéfique pour la santé.

O

onduleur : il permet de transformer le courant continu produit par des panneaux photovoltaïques ou par d'autres dispositifs en courant alternatif pour alimenter les charges ou pour qu'il puisse être réinjecté sur le réseau électrique.

oxydation : réaction au cours de laquelle un atome ou un ion perd des électrons. La plus courante est celle dans laquelle un composé se combine avec un ou plusieurs atomes d'oxygène, formant ainsi un oxyde ; oxydant : qui fait perdre des électrons à un atome ou à un ion.

P

panneau (photovoltaïque) : voir module.

passifs (systèmes) : systèmes fondés sur des forces naturelles comme la convection et la gravité, qui rendent la sûreté d'une installation théoriquement moins tributaire de systèmes actifs (pompes, moteurs, etc.).

période (radioactive) ou demi-vie : durée au bout de laquelle la moitié des atomes radioactifs initialement présents dans un échantillon du nucléide radioactif a disparu en se désintégrant naturellement.

pH : mesure de la concentration en ions hydrogène dans un liquide. Dans l'eau pure, en dessous de 7, il est acide, au-dessus il est basique (ou alcalin).

Phénix : réacteur expérimental de la filière des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium. Situé à Marcoule (Gard), ce réacteur a divergé pour la première fois en 1973 et s'est arrêté le 1^{er} février 2010. Il a permis, entre autres, d'acquérir des connaissances sur le comportement sous irradiation des matériaux envisagés dans les réacteurs du futur.

phénol : molécule cyclique de formule brute $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}$ portant une fonction hydroxyle $-\text{OH}$.

photocatalyse : catalyse de réactions chimiques sous l'action de la lumière.



photosynthèse : processus par lequel les plantes, les algues et certaines **bactéries** utilisent l'énergie solaire pour effectuer la synthèse de molécules organiques. Les plantes, les algues et les **cyanobactéries** emploient pour cela le dioxyde de carbone (ou gaz carbonique) et l'eau, et rejettent de l'oxygène (O_2).

photovoltaïque : effet par lequel l'énergie lumineuse est directement transformée en énergie électrique dans un **semi-conducteur**.

pile à combustible : pile où la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'**oxydation** sur une **électrode** d'un combustible **réducteur** (par exemple l'hydrogène) couplée à la **réduction** sur l'autre électrode d'un **oxydant**, tel que l'oxygène. Les piles classiques (H_2/O_2) sont alimentées en hydrogène et produisent de l'eau.

plantes supérieures : organismes **photosynthétiques** se caractérisant par l'existence de racines et la présence de vaisseaux assurant la circulation de la sève. Elles regroupent notamment les plantes à graines, les plantes à fleurs, les fougères...

plasma : état de la matière portée à une température telle que les atomes sont en majorité ou en totalité ionisés (les électrons sont séparés des noyaux).

plenum : chambre (ou réservoir) remplie par un fluide. Un **plenum sodium** au-dessus du cœur d'un réacteur est un volume de **sodium** qui, en se vidangeant lors d'une hypothétique ébullition, permet de diminuer la **réactivité**.

plutonium : élément chimique de **numéro atomique** 94 et de symbole **Pu** possédant des **isotopes**, de ^{232}Pu à ^{247}Pu . Cinq sont importants pour l'industrie nucléaire : du ^{238}Pu au ^{242}Pu , surtout le ^{239}Pu , élément **fissile**, produit dans les réacteurs à partir d'**uranium 238**.

polymérisation : ajout progressif de molécules de **monomères** les unes aux autres par des **liaisons covalentes**, formant un **polymère**, macromolécule de poids moléculaire élevé répétant un même motif.

pouvoir calorifique inférieur (PCI) : quantité de chaleur dégagée par la combustion complète à pression constante d'un **normo-mètre cube** de gaz, l'eau formée étant sous forme vapeur. L'énergie de la vapeur d'eau n'est pas récupérée.

produits de fission : **nucléides** générés soit directement par la **fission** nucléaire, soit indirectement par la **désintégration** des fragments de la fission. Ils sont gazeux (**gaz de fission**) ou solides (volatils ou non).

prolifération : dissémination incontrôlée des technologies ou des matières nucléaires à usage militaire.

protéine : constituant macromoléculaire principal des cellules, formé par l'enchaînement, codé par l'**ADN**, d'**acides aminés**.

protistes : ils regroupent des eucaryotes (organismes dont le patrimoine **génétique** est contenu dans un noyau) autres que les plantes, les champignons ou les animaux. Certains appartiennent au règne végétal et réalisent la **photosynthèse** (algues), d'autres appartiennent au règne animal. De très nombreux protistes sont dotés de flagelles ou de cils qui leur permettent de se déplacer.

puissance crête (d'un module photovoltaïque) : puissance électrique maximale que délivre un **module photovoltaïque** pour un ensoleillement « standard » de $1\,000\text{ W/m}^2$ et une température de 25°C .

puissance résiduelle : puissance thermique dégagée par un réacteur nucléaire à l'arrêt ou par un **assemblage combustible**. Elle est principalement produite par les **fissions** résiduelles, la

désintégration des **actinides** et des **produits de fission** et d'**activation** contenus dans le **combustible** et les matériaux de structure. Au moment de l'arrêt (chute des barres d'arrêt), son niveau est de quelques dizaines de pour cent de la *puissance nominale* puis décroît très rapidement.

puits quantique : région d'épaisseur **nanométrique** dans laquelle chaque électron ne peut se déplacer que dans (idéalement) deux dimensions de l'espace. Un puits quantique peut être réalisé en empilant des couches minces de **semi-conducteurs** de diverses **bandes interdites**.

R

radioactivité : propriété d'un **nucléide** de se transformer spontanément en un autre nucléide, avec émission d'un rayonnement (particules, rayons X, rayons gamma...), ou d'être le siège d'une **fission** spontanée accompagnée d'une émission de particules et de rayons gamma.

radioélément : élément dont tous les **isotopes** sont **radioactifs**.

radiofréquence (RF) : fréquence qui se situe dans la gamme 9 kHz - $3\,000\text{ GHz}$.

radioisotope : **isotope radioactif** d'un élément.

radionucléide : **nucléide** instable d'un élément qui **décroît** ou **se désintègre** spontanément en émettant un rayonnement.

réacteur à eau bouillante (REB) : réacteur dans lequel l'ébullition de l'eau se fait directement dans le cœur.

réacteur à eau lourde sous pression (RELPS) : réacteur qui utilise de l'**uranium naturel** comme **combustible** et de l'eau lourde (D_2O) comme **caloporteur**. L'eau lourde est maintenue sous pression jusqu'à son point d'ébullition, ce qui permet d'augmenter sa température pour transporter plus de chaleur en dehors du cœur du réacteur.

réacteur à eau sous pression (REP) : réacteur dans lequel la chaleur est transférée du cœur à l'échangeur de chaleur par de l'eau maintenue sous une pression élevée dans le circuit primaire, afin d'éviter son ébullition.

réacteur à neutrons rapides (RNR) : réacteur sans modérateur dans lequel la majorité des **fissions** sont produites par des neutrons présentant des énergies du même ordre de grandeur que celle qu'ils possèdent lors de leur production par fission.

réacteurs à eau légère (REL) : famille de réacteurs dans lesquels l'eau ordinaire joue à la fois le rôle de **caloporteur** et de modérateur. La famille des REL regroupe les **réacteurs à eau sous pression REP** et les **réacteurs à eau bouillante REB**.

réacteurs nucléaires de quatrième génération : nouvelle génération de systèmes énergétiques nucléaires, étudiée à l'échelle internationale, présentant à la fois des qualités d'économie, de sûreté, de minimisation des **déchets** et de résistance à la **prolifération** améliorées par rapport aux réacteurs existants ou en construction. Six filières de réacteurs, la plupart à **cycle fermé** et à **neutrons rapides**, ont été retenues pour l'approfondissement des études, utilisant comme **caloporteur** le **sodium**, le plomb, l'**eau supercritique**, le gaz (hélium) ou des sels fondus.

réaction en chaîne : suite de **fissions** nucléaires au cours desquelles les neutrons libérés provoquent de nouvelles fissions, à leur

tour génératrices de nouveaux neutrons provoquant de nouvelles fissions et ainsi de suite.

réactivité : écart relatif par rapport à l'unité du nombre de neutrons produits par **fission** divisé par le nombre de neutrons disparus au sein d'un réacteur nucléaire.

recombinaison homologue : recombinaison **génétique** entre deux **séquences** identiques situées sur deux molécules d'**ADN** différentes, ou distantes l'une de l'autre sur la même molécule.

recyclage : valorisation de matières réutilisables après un processus de production. Dans un réacteur nucléaire, réutilisation de matières **fissiles** (**plutonium** généré, **uranium 235** résiduel...) issues d'un cycle précédent après **traitement** du **combustible usé**.

redox (pour réduction/oxydation) : une **réaction d'oxydo-réduction** est une réaction chimique au cours de laquelle se produit un transfert d'électrons. L'espèce chimique qui capte les électrons est appelée **oxydant** et celle qui les cède, **réducteur**.

réduction : réaction au cours de laquelle un atome ou un ion gagne des électrons cédés par un **réducteur**.

rendement de conversion (d'une cellule photovoltaïque) : rapport entre l'énergie électrique produite par une **cellule photovoltaïque** et l'énergie lumineuse reçue sur la surface correspondante.

résine phénolique : elle est obtenue par polycondensation de **formaldéhyde** et de **phénol**.

S

sélectivité (chimio-, régio- et stéréo-) : une réaction est **chimiosélective** si elle conduit à l'attaque préférentielle d'un groupe fonctionnel au sein d'une molécule parmi d'autres groupes. Une réaction est **régiosélective** si elle conduit à l'attaque préférentielle d'une partie d'un groupe fonctionnel qui possède plusieurs parties réactives. Une réaction est **stéréosélective** si elle conduit de façon préférentielle, voire exclusive, à l'un des stéréoisomères possibles (composés ayant la même formule semi-développée mais qui diffèrent par l'agencement spatial de leurs atomes).

semi-conducteur : matériau dans lequel la bande d'états électroniques occupés (**bande de valence**) est séparée de la bande des états inoccupés (**bande de conduction**) par une **bande d'énergie interdite (gap)** relativement étroite. Un tel matériau est un isolant électrique au zéro absolu, mais devient modérément conducteur lorsque sa température est suffisamment élevée pour exciter des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. De **type n** (électrons porteurs de charge majoritaires) ou de **type p** (trous porteurs de charge majoritaires) selon les **dopants** utilisés.

séquence : ordre d'enchaînement des éléments constitutifs dans les **polymères** biologiques (**ADN**, acide ribonucléique ARN, **protéines**). Le **séquençage** est la détermination de cet ordre.

silicium : semi-conducteur le plus répandu, largement utilisé en microélectronique et également dans la fabrication des **cellules photovoltaïques**. Il existe à l'état non cristallin (**silicium amorphe**) et à l'état **cristallin** (c-Si), dénomination qui regroupe les différentes formes cristallines (microcristallin μ -Si, monocristallin sc-Si, multicristallin mc-Si et polycristallin pc-Si).

simple jonction ou à jonction p-n (cellules photovoltaïques) : zone d'un matériau où le dopage varie brusquement,

passant de p à n. Dans le cas de **cellules silicium**, du silicium **dopé n** (une très faible part des atomes de silicium a été remplacée par un donneur d'électrons, tel le phosphore ou l'arsenic) est associé à du silicium **dopé p** (des atomes de silicium ont été remplacés par un accepteur d'électrons, tel le bore ou le gallium). Dans une **cellule photovoltaïque**, le champ électrique de la jonction p-n sépare les paires électron-trou créées par la lumière.

sodium : métal alcalin utilisé à l'état liquide comme **caloporteur** des **réacteurs à neutrons rapides** en raison de sa « transparence » aux neutrons, de ses bonnes propriétés de transport de la chaleur et de son excellente compatibilité avec les aciers.

spectre (neutronique) : distribution en énergie de la population des neutrons présents dans le cœur d'un réacteur.

spectroscopie d'impédance électrochimique : son principe repose sur l'application d'une faible tension sinusoïdale (perturbation) superposée à la tension nominale et sur l'analyse de l'amplitude et du déphasage du courant de réponse. Elle fournit des informations sur les mécanismes réactionnels qui se déroulent à l'interface **électrode/électrolyte**.

stellarator : dispositif analogue au **tokamak**, mais dans lequel le confinement du **plasma** est entièrement réalisé par le champ magnétique hélicoïdal créé par l'arrangement complexe de bobines autour du tore.

stockage (de déchets radioactifs) : opération consistant à placer les **déchets radioactifs** dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive. Ce terme désigne aussi l'installation dans laquelle les déchets sont placés, sans projet de reprise ultérieure. La reprise serait néanmoins possible dans le cas d'un stockage réversible (voir aussi **entreposage**). Le **stockage en couche géologique profonde** des déchets radioactifs est le stockage de ces substances dans une installation souterraine spécialement aménagée à cet effet.

stœchiométrie : étude des proportions suivant lesquelles, au cours d'une réaction chimique, les réactifs se combinent et les produits se forment.

supercritique (fluide) : fluide qui, placé dans des conditions de température et de pression supérieures à leurs valeurs critiques, présente une **viscosité** proche de celle des gaz, une densité proche de celle des liquides, et une diffusivité élevée. Son pouvoir solvant évolue avec les conditions de pression et de température. Fluides les plus utilisés : le **dioxyde de carbone (CO₂)** en raison de sa basse température critique (31 °C) et l'**eau (H₂O)** pour son fort pouvoir **oxydant**.

Superphénix : réacteur prototype à **neutrons rapides** refroidi au **sodium** situé à Creys-Malville (Isère), actuellement en cours de déconstruction. Il a atteint sa pleine puissance en 1986 et s'est arrêté en 1998. Le cœur comprenait 364 **assemblages**, constitués chacun de 271 aiguilles combustibles contenant un empilement de pastilles d'oxyde mixte **U-Pu-O₂**.

supraconducteur : métal ou alliage dont la résistivité (capacité du matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique) tombe brusquement à une valeur quasi nulle en dessous d'une température **critique (supraconductivité)**.

surface spécifique : superficie réelle de la surface d'un objet (prenant en compte sa rugosité par exemple) par opposition à sa surface apparente.

sur(r)générateur : réacteur nucléaire qui produit, à partir de matière **fertile**, plus de matière **fissile** qu'il n'en consomme.



T

taux d'actualisation (d'un projet) : taux économique, en partie analogue à un taux d'intérêt, qui reflète la valeur du temps – et inclut parfois le risque – pour évaluer économiquement un projet qui se déroule sur plusieurs années. Typiquement, les taux publics sont de l'ordre de 5 % et les taux privés de 10 % dans les pays européens (ces taux sont présentés ici hors inflation : on les qualifie alors de taux « réels », par opposition à des taux « nominaux »).

taux de combustion : rapport, habituellement exprimé en pourcentage, du nombre de noyaux atomiques d'un élément ou d'un ensemble d'éléments donnés qui disparaissent par **fission** au nombre de noyaux initiaux présents dans le **combustible**. Il est alors exprimé en at %. Couramment utilisé pour évaluer l'*épuisement spécifique*, quantité d'énergie thermique par unité de masse de combustible obtenue en réacteur entre le chargement et le déchargement du combustible (*combustion massique*), il s'exprime en mégawatt-jour par tonne (MW·j/t) ou en gigawatt-jour par tonne (GW·j/t).

terres rares : famille d'éléments qui comprend essentiellement les **lanthanides** ainsi que l'yttrium [39] et le scandium [21].

thermoplastique (matière) : matière qui se ramollit lorsqu'elle est chauffée au-dessus d'une certaine température et qui, au-dessous, redevient dure sans être dégradée, et cela de façon répétée. C'est le cas des métaux, du verre et de certains **polymères**.

tokamak : acronyme de *Toroidalnaya Kamera Magnitnima Katushkani* (chambre à vide toroïdale et bobine magnétique) ou association des trois mots russes *Tok* (courant), *Kamera* (chambre) et *Mak* (magnétique) définissant les machines en forme de tore dans lesquelles est étudiée la **fusion thermonucléaire par confinement magnétique** en confinant le **plasma** de fusion grâce à des champs magnétiques.

tomographie électronique : technique d'imagerie qui permet d'obtenir une représentation en trois dimensions d'un objet. En utilisant des microscopes électroniques spécifiques et performants, une résolution de quelques **nanomètres** est accessible.

traceur : organisme, élément ou substance, naturel ou artificiel, permettant l'étude des processus physiques, chimiques ou biologiques du milieu dans lequel il se trouve placé. Le traceur peut notamment être **isotopique** et/ou **radioactif**.

tracker : dispositif qui permet aux **panneaux photovoltaïques** des centrales solaires au sol ou aux cellules à concentration de suivre la course du soleil, optimisant ainsi leur rendement énergétique. Le tracker à un axe suit la rotation du soleil d'Est en Ouest au fur et à mesure de l'avancement de la journée. Le tracker à deux axes prend également en compte la hauteur du soleil selon la saison.

traitement ou retraitement (du combustible usé) : tri sélectif des matières contenues dans les **combustibles usés** afin d'en extraire celles qui sont valorisables et **recyclables** (**uranium** et **plutonium**) ou éventuellement **transmutables**, et de **conditionner** les **déchets ultimes**.

transestérification : réaction au cours de laquelle le groupement R' d'un ester (la fonction ester est formée d'un atome de carbone lié à un groupement H ou R, à un atome d'oxygène par une double liaison et à un groupement O—R') s'échange avec le groupement R'' d'un alcool R''OH.

transmutation : transformation d'un **nucléide** en un autre par une réaction nucléaire. La transmutation envisagée pour la gestion des **déchets radioactifs** vise à transformer un nucléide à **période** longue en un nucléide à période plus courte ou en un nucléide stable.

tritium (T) : **isotope radioactif** de l'hydrogène à **demi-vie** courte. Son noyau est formé d'un proton et de deux neutrons.

U

uranium : élément chimique de **numéro atomique** 92 et de symbole **U**, qui existe à l'état naturel (**uranium naturel**) sous forme d'un mélange de trois **isotopes** : ²³⁸**U** fertile (99,28 %), ²³⁵**U** fissile (0,71 %) et ²³⁴**U** (traces).

uranium enrichi : **uranium** dont la teneur en **isotope 235** a été portée de son faible niveau naturel (0,71 % en masse) à, par exemple, 3,5 % pour un **combustible** destiné à un **réacteur à eau sous pression**.

V

véhicule hybride : véhicule qui associe plusieurs modes de génération de l'énergie motrice. Une formule actuellement privilégiée est l'hybridation série qui combine un moteur à combustion interne et une **batterie** alimentant une chaîne de traction électrique ; le premier, fonctionnant à régime constant, donc à son meilleur rendement, recharge la batterie qui absorbe les pics de courant et récupère l'énergie de freinage. Il existe également une version « 2 moteurs », un électrique et un thermique, qui sont à même, séparément ou ensemble, d'assurer la traction. Ils se « partagent » la puissance maximale tout en fonctionnant chacun dans les régimes qui leur sont les mieux adaptés, en étant aussi capables de récupérer l'énergie de freinage. Une autre formule consiste à associer une batterie et une **pile à combustible**.

véhicule hybride rechargeable : d'architecture comparable à un **véhicule hybride** classique, il est doté d'une autonomie accrue en mode électrique grâce à l'intégration d'une **batterie** de plus grande **capacité** et la possibilité de la recharger à une prise électrique.

verre nucléaire : matrice minérale utilisée pour le confinement des **déchets nucléaires** de haute **activité**. Le verre présente la structure d'un liquide figé, c'est-à-dire un ordre à courte distance et une absence d'ordre à moyenne distance, ce qui lui permet d'accueillir la plupart des **produits de fission** et des **actinides mineurs** issus du **traitement** des **combustibles usés**.

viscosité : résistance à l'écoulement uniforme d'un fluide.

vitrification : opération consistant à incorporer les **déchets radioactifs** dans du **verre** pour leur donner un **conditionnement** stable, sous forme de colis susceptibles d'être **entreposés** ou **stockés**.

W

watt (W) : unité de puissance correspondant à la consommation ou la production d'un joule par seconde. Principaux multiples : le kilowatt (1 **kW** = 10³ watts), le mégawatt (1 **MW** = 10⁶ watts), le gigawatt (1 **GW** = 10⁹ watts) et le térawatt (1 **TW** = 10¹² watts) ; **watt-heure (Wh) :** énergie consommée ou délivrée par un système d'une puissance de 1 W pendant 1 heure. La puissance thermique s'exprime en **Wth** et ses multiples, la puissance électrique en **We** et ses multiples.

watt-crête (Wc) : unité de mesure de la puissance électrique maximale pouvant être fournie par une installation **photovoltaïque** dans des conditions standards (1 000 **W/m²**, 25 °C).



www.cea.fr