

DE LA RECHERCHE  
À L'INDUSTRIE

19

# → Énergies du XXI<sup>e</sup> siècle

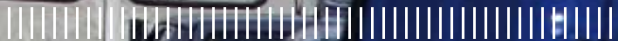


INNOVER POUR L'ÉNERGIE  
NUCLÉAIRE

DOMESTIQUER L'ÉNERGIE  
SOLAIRE

PRODUIRE DES BIOCARBURANTS  
DÉVELOPPER BATTERIES ET PILES  
À COMBUSTIBLE

PRÉPARER LA FUSION  
THERMONUCLÉAIRE



# Energies du XXI<sup>e</sup> siècle

---

## INNOVER POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE 6

Les débuts de l'énergie  
nucléaire en France 7

La troisième génération 8

Génération IV : de nouveaux  
concepts 10

---

## DOMESTIQUER L'ÉNERGIE SOLAIRE 13

Energie solaire thermique 15

Energie solaire  
photovoltaïque 16

Energie solaire  
à concentration 19

---

## PRODUIRE DES BIOCARBURANTS 20

Biomasse 21

Biocarburants de  
2<sup>e</sup> génération 22

---



© Jack Star/PhotoLink

---

## DÉVELOPPER BATTERIES ET PILES À COMBUSTIBLE 25

Batteries Lithium-ions 26

À chaque batterie  
son application 27

Vecteur hydrogène 29

---

## PRÉPARER LA FUSION THERMONUCLÉAIRE 31

Des études en tokamak 33

Projet ITER 34

---



© P. Vigano/CEA



© C. Héraud/CEA



© P. Dumais/CEA

L'appauvrissement des sources fossiles et le réchauffement climatique incitent à développer les recherches sur les nouvelles technologies de l'énergie (à gauche la pile Zoé, premier réacteur nucléaire français - à droite, l'Institut national sur l'énergie solaire).

**D**epuis un siècle, la maîtrise des ressources en énergie (le charbon, le pétrole, le gaz et dans une certaine mesure le nucléaire) a permis une hausse considérable du niveau de vie des populations, spécialement dans les pays développés.

Entre aujourd'hui et 2025, la population mondiale passera de 6,7 à 8 milliards d'êtres humains. La consommation d'énergie primaire passera de 12 Gtep à 17 Gtep\*. La Chine et l'Inde représenteront à elles seules 40 % de cette croissance. Les stocks d'énergie fossile sont estimés à 50 ans pour le pétrole, 60 ans pour le gaz et l'uranium et 150 ans pour le charbon. Les émissions de gaz à effet de serre (GES) passeront de 27 à 42 Gt.équ.CO<sub>2</sub> \*\*.

Le monde est donc confronté à une double menace liée à l'énergie, celle de ne pas disposer d'approvisionnements suffisants et sûrs à des prix acceptables (épuisement des ressources) d'une part, celle de nuire à l'environnement (augmentation de l'effet de serre) par une consommation excessive d'autre part.

Climat et énergie sont intimement liés et les enjeux sont planétaires. Suivant les conclusions du Groupement d'experts intergouvernemental pour l'étude du climat (Giec), le protocole de Kyoto, signé en 1997, impose à 159 pays industrialisés de réduire leurs émissions de GES d'ici à 2012. En décembre 2008, l'Union européenne a signé l'engagement des trois 20 en 2020 : 20 % d'énergies renouvelables, 20 % de GES en moins, 20 % d'efficacité énergétique en plus, et 10 % de biocarburants. Le mix énergétique s'impose, associant aux énergies fossiles et nucléaires les énergies dites renouvelables : éolien, hydroélectrique, solaire, biocarburants et géothermie.

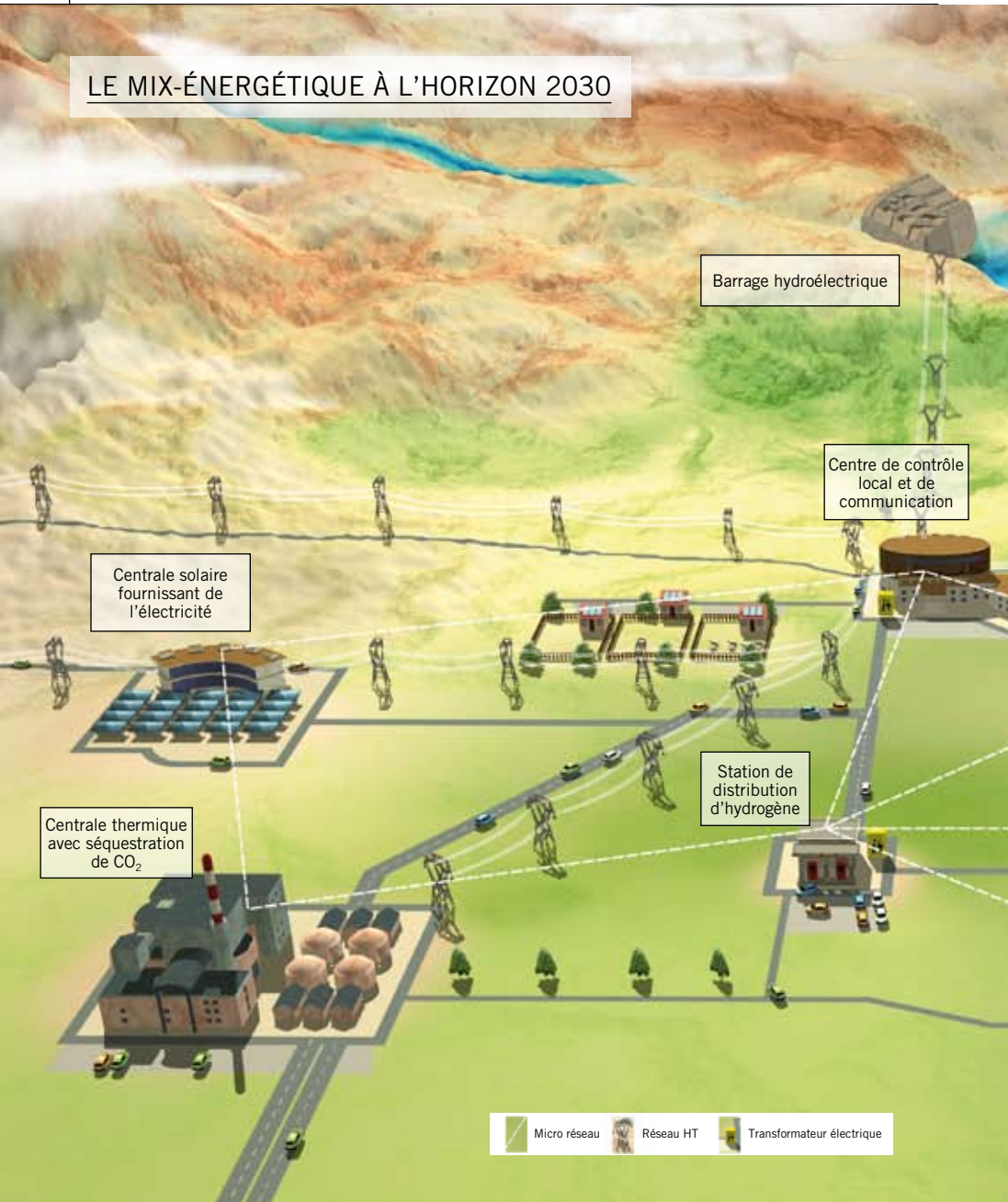
En France, trois nouvelles plateformes technologiques se développent : la première concerne l'énergie solaire, la seconde les biocarburants et la troisième les énergies maritimes.

Le CEA est associé aux deux premières. Il travaille en parallèle sur la thématique du vecteur d'énergie hydrogène et le stockage de l'énergie, tout en continuant ses recherches sur la quatrième génération de réacteurs nucléaires et sur l'énergie de fusion.

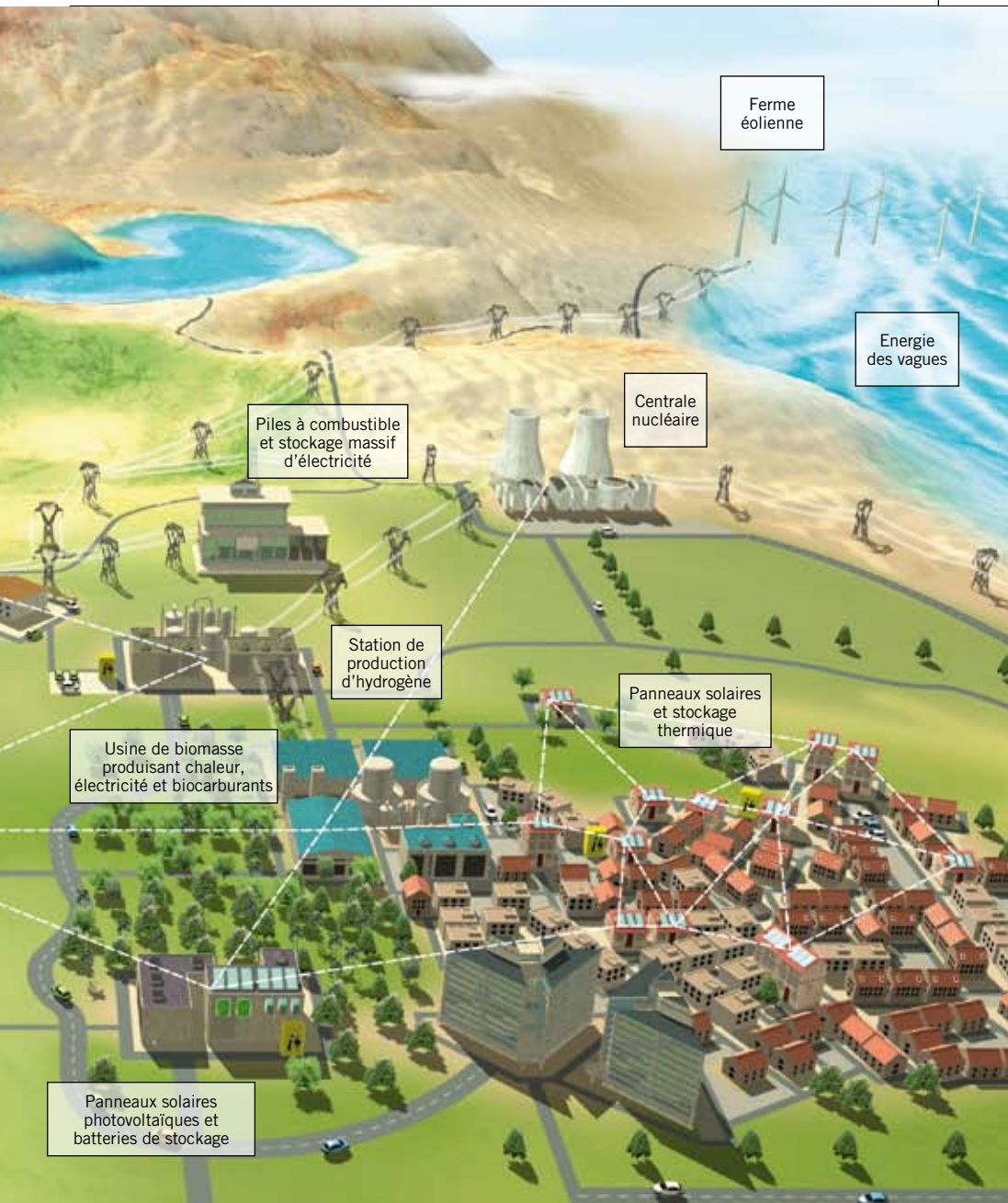
\* milliards de tonnes équivalent pétrole cf. page 21

\*\* milliards de tonne équivalent CO<sub>2</sub>

# LE MIX-ÉNERGÉTIQUE À L'HORIZON 2030







L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE EST UTILISÉE DEPUIS UN DEMI-SIÈCLE À DES FINS CIVILES. LA TROISIÈME GÉNÉRATION DE RÉACTEURS ASSURE UNE OPTIMISATION DES RESSOURCES. POUR CEUX DE LA QUATRIÈME GÉNÉRATION, LES CHERCHEURS TRAVAILLENT SUR DES CONCEPTS TOTALEMENT INNOVANTS.

# Innover pour l'énergie nucléaire



## RÉACTEUR EXPÉRIMENTAL OSIRIS

La réaction nucléaire est caractérisée par la leur bleutée due à l'effet Tcherénkov.



#### RÉACTEUR ÉOLE

L'opérateur retire un crayon combustible en vue de lui faire subir une spectrométrie gamma.

Ce réacteur, de très faible puissance, est destiné aux études neutroniques de réseaux modérés, en particulier ceux des REP industriels.

## LE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

L'uranium fournit plus d'énergie, 10 000 fois plus, qu'un combustible fossile (charbon ou pétrole). Ce minerai ne peut pas être utilisé pur, il doit subir différents traitements et enrichissements pour pouvoir servir de combustible. (cf livret «Le cycle du combustible»). Toutefois, après une première utilisation dans un réacteur, le combustible peut être retraité. L'uranium et le plutonium, encore utilisables, sont récupérés pour produire un nouveau combustible : le MOX (Mélange d'Oxydes). Sur l'ensemble du parc nucléaire français, EDF utilise le mélange MOX depuis les années 1990, dans 20 réacteurs à eau pressurisée (REP).

**L'énergie nucléaire est née à la fin des années 1930 avec la découverte de la réaction de fission. Mais ce n'est qu'en décembre 1953, en pleine guerre froide, que l'énergie nucléaire est utilisée à des fins civiles. Le président américain Eisenhower incite à développer cette nouvelle énergie « pour servir l'humanité », lors de son discours « *Atoms for Peace* » devant l'ONU. D'autres états se lancent parallèlement dans cette voie : la Russie, la France et la Grande-Bretagne.**

## LES DÉBUTS DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE EN FRANCE

La France, pour sa part, a engagé un programme de développement de l'énergie nucléaire dès 1945 avec la création du Commissariat à l'énergie atomique par le Général de Gaulle. Son objectif était, et demeure, de pouvoir répondre à la demande croissante d'électricité en toute indépendance et à faible coût ; objectif renforcé après le premier choc pétrolier en 1956. Aujourd'hui, 76 % de l'électricité est d'origine nucléaire dans notre pays.

Au cours de ces soixante ans, les progrès technologiques ont permis des améliorations, des baisses de coût, une production électrique plus importante et une sûreté accrue. Ainsi trois générations de réacteurs nucléaires se sont succédé. Une quatrième est à l'étude.

Les premières centrales nucléaires, dites de première génération, ont été construites dès 1956, la dernière a été arrêtée en 1994. Cette filière à l'uranium naturel et graphite gaz (UNGG) avait une capacité de 70 à 540 MWe. La deuxième génération, dite REP (réacteur à eau pressurisée), a été installée en France à partir de 1977 et 58 réacteurs sont encore en activité. Leur puissance est plus importante que la génération précédente, de 900 à 1 450 MWe, selon les tranches.



### CARTE DES UNITÉS ÉLECTRONUCLÉAIRES EN FRANCE AU 01/01/2010

#### SITUATION DES UNITÉS

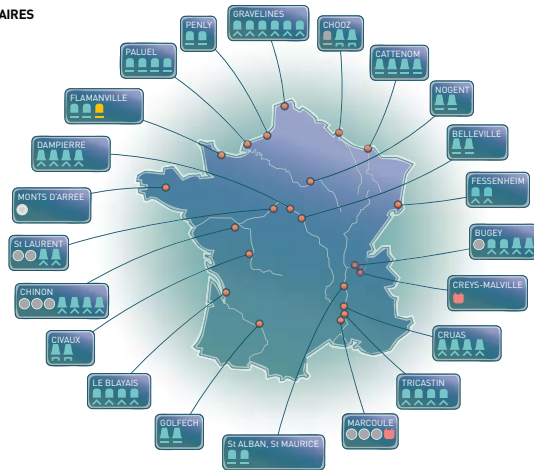
- Installées
- En construction
- Tranche déclassée
- Arrêtée

#### FILIÈRE DE RÉACTEUR

- UNGG
- Gaz - eau lourde
- Surgénérateur
- REP refroidissement circuit ouvert
- REP refroidissement circuit fermé (tours)

#### PALIER REP STANDARDISÉ

- ▲ 34 - REP 900 MWe
- ▲ 20 - REP 1300 MWe
- ▲ 4 - N4



## LA TROISIÈME GÉNÉRATION

Les réacteurs nucléaires de troisième génération sont dans la continuité des réacteurs à eau sous pression de la génération précédente. Les recherches et développements menés sur cette filière permettent d'optimiser toutes les étapes de production d'énergie, dans un double objectif d'économie et de sûreté.

**Leur conception vise des gains sensibles sur les postes suivants :**

- **la sûreté** avec, par exemple, une enceinte double en béton avec paroi d'étanchéité en métal, un récupérateur de **corium** sous le cœur

Mélange liquide à haute température (de 2 500 à 3 000°C) composé des matériaux provenant du combustible nucléaire, des gaines qui le contenaient initialement, des aciers constituant les structures du cœur et des produits de décomposition du béton.

du réacteur ;

- **la puissance** : 1 600 MWe<sup>1</sup> contre 1 450 pour les REP ;
- **la compétitivité économique** à travers

une standardisation accrue et la simplification de l'architecture. Le parc de centrales nucléaires de deuxième génération est entiè-

rement standardisé en France, ce qui permet de réduire le coût du kWh<sup>2</sup> produit à moins de trois centimes d'euros, d'où l'intérêt de suivre ce modèle de gestion ;

- **le cycle du combustible** avec un meilleur taux de combustion. L'utilisation de MOX (mélange d'uranium et de plutonium) et d'uranium enrichi retraité sera plus aisée, permettant d'optimiser le combustible de base, l'uranium. Par rapport aux générations précédentes, l'économie de consommation d'uranium est estimée à 17 % ;
- **la réduction** de la quantité de déchets de 15 à 30 % ;
- **l'augmentation** de 30 % d'électricité par an ;
- **la durée de vie** qui passe de 40 à 60 ans.

1. MWe : unité de puissance, un mégawatt électrique représente un million de watts.

2. kWh : unité de mesure de l'énergie, un kilowatt-heure correspond à 1 000 watts d'énergie consommée en une heure.



## COMMENT ÇA MARCHE ?

Pour produire de l'électricité de manière industrielle, on utilise une turbine qui transmet à un alternateur une force suffisante pour le mettre en rotation rapide. Celui-ci va alors transformer en énergie électrique l'énergie mécanique qui lui est communiquée.

La turbine peut être alimentée de différentes manières : dans une centrale hydroélectrique, c'est l'eau, chutant du barrage, qui lui communique son énergie ; dans une centrale thermique comme dans une centrale nucléaire classique, ce rôle est dévolu à de la vapeur sous pression.

Dans ce cas, on a recours à une

« chaudière » qui produit la chaleur à partir de laquelle la vapeur est générée. Mais tandis qu'une centrale thermique brûle du charbon, du pétrole ou du gaz, un réacteur nucléaire produit de la chaleur par des réactions de fission de noyaux atomiques tels que ceux de l'uranium.

Toute chaudière a besoin d'un « fluide caloporteur » pour évacuer la chaleur à transmettre. Dans les centrales nucléaires actuellement en service, ce fluide est tout simplement de l'eau.

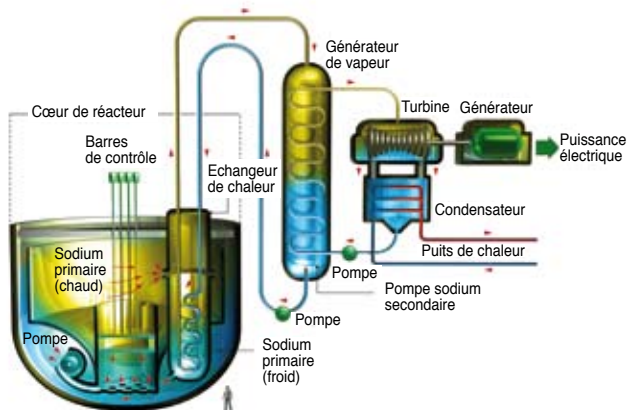
Dans les « systèmes nucléaires du futur », le rôle de caloporteur pourra être assuré par un métal liquide, comme le sodium ou le plomb, ou par un gaz, l'hélium.

### CENTRALE PHÉNIX

Turbine de cette centrale, prototype des réacteurs à neutrons rapides à sodium.



## RÉACTEUR RAPIDE À CALOPORTEUR SODIUM



### TEST ECHANGEUR THERMIQUE COMPACT

Etudes menées pour Areva dans le cadre des futurs réacteurs VHTR

En Europe, deux EPR (European Pressurized Reactor – Réacteur pressurisé européen) sont en cours de construction : l'un en Finlande, à Olkiluoto (décidé fin 2005) et le second en France, à Flamanville (depuis mi 2007) pour une mise en service en 2014. Un autre EPR est programmé à Penly. En février 2009, l'Italie a signé un accord avec Areva pour la construction de quatre EPR. La Chine a identifié le site de Taishan, en août 2008, pour accueillir deux centrales de ce type.

Soucieux d'anticiper les risques de pénurie et de s'assurer une dépendance énergétique à moyen terme, le Department of Energy (DoE) américain s'est engagé à relancer les moyens de production en électricité.

### Deux actions complémentaires touchent le domaine de l'énergie nucléaire :

- la première est destinée à étudier la faisabilité de la construction de nouveaux réacteurs aux Etats-Unis. Dans le cadre du Programme Nuclear Power 2010 (NP 2010), des experts américains ont évalué les réacteurs susceptibles d'être

construits, identifié les problèmes éventuels à résoudre tant au niveau technique que réglementaire ou administratif. Ils ont proposé des actions facilitant le déploiement à court terme de ces réacteurs nucléaires de troisième génération.

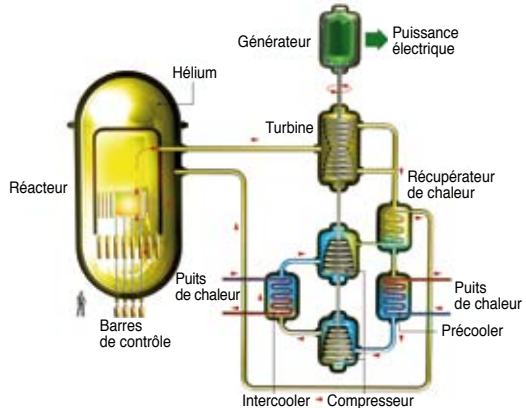
- La seconde est l'initiative du Forum international Generation IV, lancé en 2000.

## GÉNÉRATION IV : DE NOUVEAUX CONCEPTS

Le principe fondateur du Forum international Generation IV est de mettre en synergie les recherches et développements, afin de concevoir les réacteurs nucléaires qui pourraient être exploités industriellement à partir de 2040. Les pays membres se sont accordés sur les atouts de l'énergie nucléaire, d'une part pour satisfaire les besoins croissants en énergie dans le monde, d'autre part pour garantir le développement durable et prendre en compte les changements climatiques. Aujourd'hui, les membres de ce forum



## RÉACTEUR RAPIDE À CALOPORTEUR HÉLIUM



## “Les pays membres se sont accordés sur les atouts de l'énergie nucléaire.”

sont : l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada, la Chine, les Etats-Unis, Euratom, la France, le Japon, la République de Corée du Sud, le Royaume-Uni, la Russie et la Suisse.

Compte tenu des besoins variés et des contextes particuliers à chaque nation, il ne peut exister un système unique de réacteur nucléaire de quatrième génération. En 2002, six technologies ont été retenues, présentant toutes des avancées notables en matière de développement énergétique durable, de compétitivité économique, de sûreté et de fiabilité, de résistance à la prolifération et aux agressions externes. Ce sont :

**1 - VHTR** (Very High Temperature Reactor)  
Réacteur à très haute température (1 000°C/ 1 200°C), refroidi à l'hélium, dédié à la production d'hydrogène ou à la cogénération hydrogène/électricité ;

**2 - GFR** (Gas-cooled Fast Reactor)

Réacteur rapide à caloporteur hélium ;

**3 - SFR** (Sodium-cooled Fast Reactor)

Réacteur rapide à caloporteur sodium ;

**4 - LFR** (Lead-cooled Fast Reactor)

Réacteur rapide à caloporteur alliage de plomb ;

**5 - SCWR** (Supercritical Water-cooled Reactor)

Réacteur à eau supercritique ;

**6 - MSR** (Molten Salt Reactor)

Réacteur à sels fondus.

En France, le CEA travaille sur deux filières : le réacteur à neutrons rapides et caloporteur sodium (RNR-Na ou SFR) et le réacteur à neutrons rapides et caloporteur gaz (RNR-G ou GFR, dans ce cas le gaz est l'hélium). La technologie des réacteurs nucléaires à neutrons rapides permet d'utiliser les réserves d'uranium (estimées à 60 ans actuellement) pendant plusieurs milliers

d'années. Ainsi, le CEA s'est engagé sur la conception d'un prototype innovant de réacteur refroidi au sodium. L'objectif est de préparer le déploiement industriel d'une telle filière dans le parc français à l'horizon 2040, en privilégiant des recherches en innovations.

Les matériaux devront être particulièrement résistants à de très hautes températures (de l'ordre de 550°C pour le premier et de 850°C pour le second). Ainsi, des études portent sur des aciers spéciaux et de la céramique composite, ainsi que sur la nanostructuration de ces matériaux. Des matrices céramique sont testées pour remplacer les gaines, elles présentent l'avantage d'une meilleure conductivité thermique et sont capables de supporter des températures très élevées. Pour mener à bien ces recherches, les scientifiques ont recours à des réacteurs expérimentaux comme Osiris à Saclay près de Paris et bientôt, dès 2014, le réacteur Jules Horowitz (RJH) à Cadarache près de Marseille.

Côté combustible, pour chaque filière, des études sont lancées pour déterminer les caractéristiques, la géométrie du cœur de réacteur et les matériaux.

Les réacteurs en fonctionnement utilisent des pastilles composées de poudre d'uranium enrichi (de l'oxyde d'uranium), comprimée et cuite au four. Les pastilles sont empilées dans des gaines, appelées aussi crayons de combustible. Pour cette génération, les oxydes d'uranium pourraient être remplacés par des nitrures ou carbures d'uranium, qui prennent la forme de particules, bâtonnets ou anneaux.

Selon les chercheurs, l'année 2012 sera une première échéance, l'occasion de dresser un bilan sur les premières expérimentations, les recherches sur les combustibles et les matériaux, les technologies innovantes. Un seul prototype sera construit en 2020, au vu de ces résultats et selon la décision du gouvernement ; avec pour objectif plus de performance, plus de sûreté, plus d'économie, limitant les risques de prolifération et la quantité de déchets produits.





LE SOLEIL EST UNE SOURCE INÉPUISABLE D'ÉNERGIE...  
MAIS INÉGALE SELON LES RÉGIONS ET INTERMITTENTE.  
IL FAUT DÉVELOPPER DES OUTILS PERFORMANTS POUR SE CHAUFFER  
ET PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ EN S'ADAPTANT À CES CONDITIONS.

# Domestiquer l'énergie solaire

## PANNEAUX SOLAIRES DE L'INES

Chassis de test de cellules photovoltaïques et d'onduleurs.



**L'énergie solaire est disponible partout sur Terre et représente, théoriquement, 900 fois la demande mondiale en énergie. Chaque mètre carré reçoit en moyenne 2 à 3 kWh par jour en Europe du nord, 4 à 6 kWh en région Provence-Alpes-Côte d'Azur ou sous les tropiques. Les variations saisonnières ne sont que de 20 % dans ces régions, mais beaucoup plus importantes (d'un facteur 2,5) dans les pays du Nord.**

L'énergie solaire peut jouer un rôle capital pour une production locale de chaleur et d'électricité, notamment pour l'habitat individuel et collectif, où les besoins sont beaucoup moins massifs que dans l'industrie. L'exploitation de cette énergie peut se faire de trois manières : le solaire thermique,

qui transforme directement le rayonnement en chaleur et, pour la production d'électricité, le solaire thermodynamique dit à concentration (Concentrated Solar Powerplant- CSP) et le solaire photovoltaïque.

Dans les années 1970, le CEA s'est impliqué dans les applications thermiques. Il a ainsi mis en œuvre dans le Pacifique les premières maisons, hôpitaux et hôtels solaires au monde. Depuis les années 1980, il continue ses activités dans le domaine thermique pour les bâtiments et a développé des recherches vers le photovoltaïque. Ces activités de recherche se développent aujourd'hui dans le cadre de l'INES.

## INES

Vue extérieure du bâtiment



© P. Dumais/CEA

L'Institut national de l'énergie solaire (INES) a été créé en 2006. Ce projet ambitieux porté par le Conseil général de la Savoie, la Région Rhône-Alpes et le CEA, rassemble des chercheurs du CEA, du CNRS, du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) et de l'Université de Savoie.

Son objectif ?

Promouvoir et développer les énergies solaires en France et devenir un leader européen et une référence mondiale dans ce domaine.

Sur le site de Savoie Technolac, à proximité de Chambéry, l'INES regroupe plus de 250 chercheurs et ingénieurs, formateurs et industriels.

Ils sont répartis sur trois plateformes :

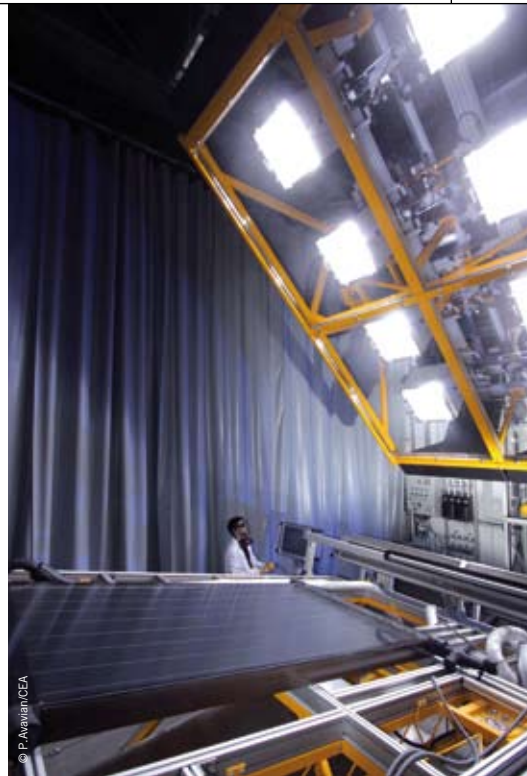
- une plateforme « recherche, développement, innovation industrielle » (RDI) qui constitue le cœur des compétences au niveau international,
- une plateforme « démonstration » qui permet de caractériser les matériels et systèmes issus de la plateforme RDI,
- une plateforme « éducation » chargée de quatre missions : l'information, la formation, l'évaluation et la promotion.

## L'ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE

Le solaire thermique est aujourd'hui relativement bien maîtrisé en termes technologique et économique. Le principe est simple : des capteurs absorbent les photons solaires et les transforment en chaleur. Cette chaleur est ensuite transmise à un liquide ou un gaz qui la transporte (on appelle cela un « fluide caloporteur ») vers un réservoir de stockage d'énergie.

L'énergie solaire thermique est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau (sanitaire ou piscines) ou des locaux. En Europe, l'eau chaude solaire représente 90 % du marché du solaire thermique. Des chauffe-eau équipent une bonne partie des maisons de certains pays du Sud (Grèce, Israël...) et sont largement diffusés en Allemagne. Les rendements atteignent 30 à 60 %. 4 m<sup>2</sup> de capteurs thermiques permettent de répondre aux besoins en eau chaude d'une famille de quatre personnes et 10 m<sup>2</sup> assurent le chauffage d'une maison de 100 m<sup>2</sup> sous nos latitudes. Son usage est croissant car il permet une autonomie énergétique à un coût modéré, sans nécessité de raccordement au réseau ni de compétences pointues au moment de l'installation. En 2004, la Chine était le marché le plus actif avec 75 % des nouveaux capteurs solaires installés dans le monde.

Au sein de l'INES, une plateforme de R&D pour l'optimisation des systèmes solaires thermiques a été mise en place. Elle développe et caractérise des composants et des systèmes innovants.



© P. Avellan/CEA

### BANC D'ENSOLEILLEMENT ARTIFICIEL

Test de performances de capteurs solaires thermiques.



## L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie solaire photovoltaïque a l'avantage de convertir directement l'énergie du Soleil en électricité.

Les applications ont démarré au début des années 1960, dans des satellites, les produits grand-public comme les montres ou les calculatrices. C'est une énergie décentralisée, idéale pour la production d'électricité dans des sites isolés où elle évite d'investir dans des kilomètres de lignes électriques de raccordement au réseau. Certains scénarios prédisent que le photovoltaïque pourrait devenir, d'ici 40 ou 50 ans, l'une des deux premières sources d'énergie. Le taux de croissance annuelle du marché augmente depuis 15 ans, il était de 40 % en 2007 (4 000 MW installés cette année-là dans le monde). En France, le Grenelle de l'Environnement prévoit une importante contribution du solaire photovoltaïque d'ici 2020. Il constitue une option prometteuse pour pallier la demande croissante de l'habitat à condition d'être économiquement compétitif.

Tout l'enjeu des recherches actuelles est d'améliorer les rendements et de réduire les coûts des cellules photovoltaïques. La conversion de l'énergie lumineuse d'une cellule photovoltaïque est de 15 à 20 %, ce qui compense largement l'énergie mobilisée pour sa fabrication et permet

de produire de l'électricité excédentaire. Ces rendements sont en constante amélioration, d'environ 4 % tous les dix ans, en laboratoire avant d'être industrialisés. De fortes ruptures technologiques sont néanmoins indispensables pour réduire encore le coût du kilowatt photovoltaïque et augmenter les performances des systèmes photovoltaïques (cellules, modules, stockage, électronique...). Dans ce cadre, les chercheurs travaillent autour de trois axes :

### 1 - Amélioration du rendement de conversion de l'énergie lumineuse et abaissement du coût de fabrication des photopiles.

Les recherches en cours visent des rendements de l'ordre de 20 à 25 %, par des technologies qui doivent être économiquement viables pour les industriels. Il s'agit de développer de nouveaux concepts. Le silicium, matériau de base de ces cellules, est présent sur Terre en très grande quantité, dans les forêts ou les plages. Actuellement, 95 % du marché repose sur cette filière. Le silicium utilisé doit être de qualité « électronique », c'est-à-dire de très grande pureté, son élaboration est donc relativement onéreuse. Pour réduire ce coût, les chercheurs étudient plusieurs pistes : utilisation de silicium moins purifié, baisse des quantités nécessaires au fonctionnement de la cellule grâce à des technologies innovantes, mise au point de nouveaux matériaux organiques plastiques ou polymères. Moins chers, dégradables et





© P. Alajam/CEA

### CHAÎNE DE MONTAGE DE MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

dont le process associe :

- technologie éprouvée du double-vitrage
- interconnexion des cellules sans soudure
- encapsulation par dépression

faciles à manipuler, ceux-ci ouvrent de nouvelles voies dans la conception des cellules, en s'inscrivant dans une logique de développement durable.

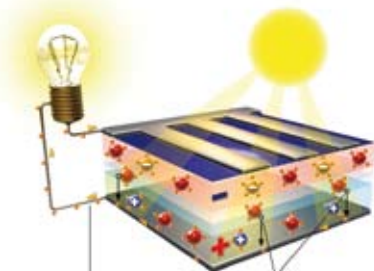
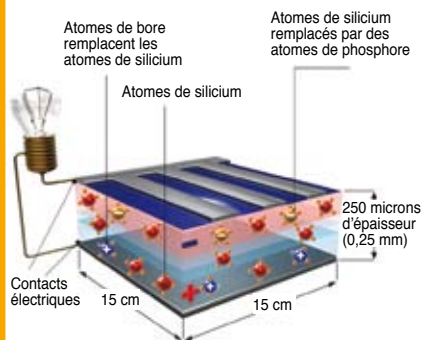
### 2 - Réduction du coût du stockage de l'énergie (par exemple pour les applications portables).

Si l'électricité produite grâce au solaire photovoltaïque peut être connectée au réseau, elle peut aussi être utilisée sur le site de production. Mais le Soleil n'étant pas toujours disponible (nuit, nuages), il est indispensable de disposer d'un système de stockage permettant de restituer l'énergie dont on a besoin au moment où on le souhaite. C'est le maillon faible du système et il faut améliorer les batteries au plomb actuelles pour que, dans la durée, le stockage soit meilleur. Des batteries nickel-cadmium et surtout lithium-ion sont aussi testées. Ces dernières offrent de meilleurs rendements, une meilleure durée de vie et sont plus adaptées au solaire en terme de compacité. Le CEA contribue au développement de ces batteries et à l'optimisation de leur gestion.

### 3 - Optimisation de la gestion de l'énergie dans l'habitat, pour pouvoir à terme disposer d'habitats autonomes en énergie.

Des modules produisant à la fois de l'électricité et de la chaleur de manière à combiner le plus efficacement possible la production d'énergie solaire d'origine thermique et photovoltaïque sont développés.

## COMMENT MARCHE UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ?



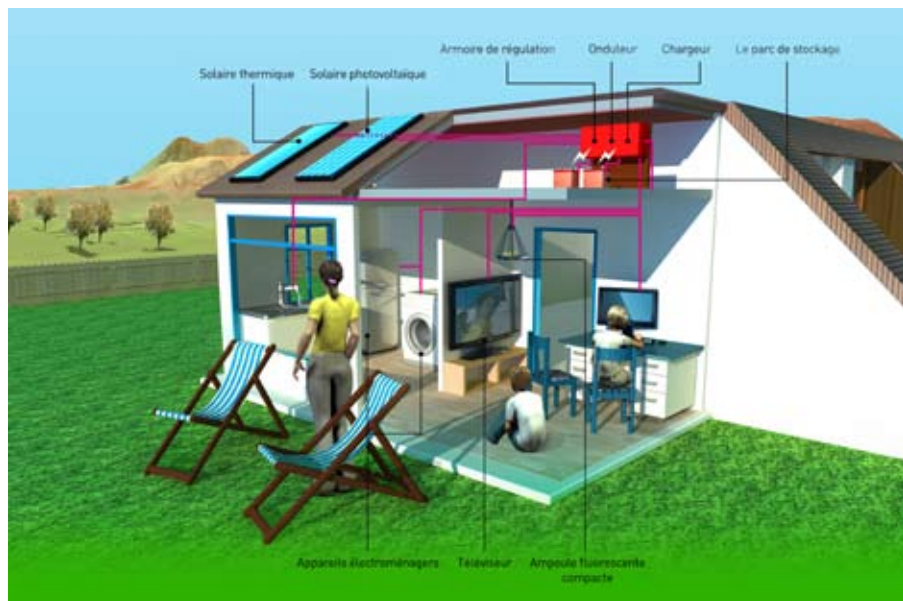
Avec un contact électrique, les électrons se déplacent dans le circuit et génèrent un courant électrique.

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium.

## MAISON SOLAIRE

Le bâtiment représente 46 % de la consommation d'énergie finale (énergie livrée au consommateur pour une utilisation finale) en France, environ deux tiers pour le résidentiel et un tiers pour le tertiaire. Ce « poste » est

responsable de 25 % des émissions de CO<sub>2</sub> au niveau national, soit environ 120 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. C'est donc une application prioritaire pour l'utilisation de l'énergie solaire.



En 2008, l'Allemagne cumule 40 % et le Japon 25 % du solaire photovoltaïque installé dans le monde. Ces deux pays concentrent aussi la moitié de la production mondiale de cellules. Le kWh reste encore onéreux, et sa compétitivité dépend de l'ensoleillement. Raccordé au réseau, il est compris entre 30 et 60 centimes d'euro pour un ratio de 900 heures de soleil par an, moitié moins si le ratio est double. Mais son coût décroît de 5 % par an et il deviendra en 2020 compétitif sur 60 à 90 % du marché européen. Le photovoltaïque autonome est plus cher car il inclut les moyens de stockage. Le kWh se situe dans une fourchette de 0,75 à 1,5 euro. Dans

les pays en voie de développement, ce prix est tout de même compétitif comparé à l'utilisation de groupes électrogènes ou de piles.

Profitant des taux d'ensoleillement du Sud de la France, le groupe Valéco a inauguré fin 2008 la première centrale photovoltaïque au sol, à Lunel dans l'Hérault. Constituée de 6 732 modules, elle produit annuellement entre 600 et 750 MWh, ce qui correspond à la consommation moyenne de 242 foyers. EDF Energies nouvelles a construit une centrale du même type à Narbonne, dans l'Aube, de 95 000 modules pour 9,2 GWh par an.

## “La plus grande centrale thermique au monde est située en Californie.”

### L'ÉNERGIE SOLAIRE À CONCENTRATION

L'énergie thermique du Soleil permet aussi de produire de l'électricité par voie thermodynamique : la technologie la plus mature industriellement est la concentration de la lumière par des miroirs cylindro-paraboliques. Ce type de miroirs, long d'une centaine de mètres, concentre la chaleur sur un tube récepteur contenant un fluide caloporteur ; le fluide génère ensuite de la vapeur qui est turbinée pour produire de l'électricité. La plus grande centrale thermique au monde est située en Californie ; sa puissance électrique atteint 350 mégawatts.

Il existe une autre technologie : des centaines de miroirs (héliostats) servent à faire converger le rayonnement solaire sur une tour de grande hauteur au sein de laquelle est placée une chaudière. Dans cette chaudière, des liquides caloporteurs vont emmagasiner la chaleur, la transporter vers un réservoir d'eau et échanger leur chaleur avec l'eau qui va se transformer en vapeur et entraîner les turbines pour produire de l'électricité comme dans les centrales thermiques conventionnelles. La puissance de ce type d'installation est de l'ordre de quelques mégawatts à une centaine de mégawatts. En

France, à Font-Romeu dans les Pyrénées, le prototype de centrale solaire à tour Themis a été exploité de 1983 à 1986. Sa puissance était de 2,5 MW.

Actuellement, 2 000 MW sont en construction et 11 000 MW en projet dans le monde. Des centrales industrielles ont été mises en service en Espagne, notamment près de Séville. En France, la centrale de Solenha de 12 MW est en cours d'étude. Le solaire à concentration (ou Concentrated Solar Power - CSP) représente la technologie la plus probable pour le déploiement massif du solaire en Afrique du Nord. Le coût du kWh est encore élevé, et fonction de l'ensoleillement du site choisi, mais va globalement décroître pour rejoindre celui du kWh issu de l'énergie fossile vers 2020.

Le CEA travaille sur certains verrous de la filière (échangeurs de chaleur, gestion, stockage de l'énergie).

#### À GAUCHE

Alignement de panneaux solaires.

#### AU CENTRE

Laboratoire de test, de vieillissement accéléré et de caractérisation de batteries au plomb.

#### À DROITE

Centrale solaire de Barstow, en Californie.



© Eyewire, Inc.



© Dupont/CEA



© Eyewire, Inc.

SOURCE PRINCIPALE D'ÉNERGIE, LA BIOMASSE REVIENT EN FORCE EN OCCIDENT. LES RECHERCHES MENÉES AUJOURD'HUI CONCERNENT LES BIOCARBURANTS, PRODUITS PAR VOIE BIOLOGIQUE OU THERMOCHIMIQUE.

# Produire les biocarburants



© C.Boisard/PhotoLink



**PROGRAMME BIOCARB**

Echantillons de biomasse  
lignocellulosique.



**La biomasse est l'énergie stockée dans la matière organique. Plus de 90 % de cette énergie est d'origine végétale. Pour 3 milliards d'individus, soit la moitié de l'humanité, la biomasse dite traditionnelle (sous la forme de bois, déchets végétaux, charbon de bois auxquels on ajoute la bouse de vache séchée) est la source principale, sinon unique, d'énergie.**

## BIOMASSE

La biomasse constitue une ressource renouvelable permettant de produire des carburants de synthèse utilisables dans les moteurs traditionnels, essentiellement pour le transport terrestre. Ces « biocarburants » sont actuellement majoritairement produits à partir de cultures agricoles comme la betterave, le blé, la canne à sucre. Ils n'utilisent qu'une partie de la plante et le rendement dépend de la variété agricole utilisée. Un hectare de blé produit 2 500 litres d'éthanol pour 6 500 litres pour un hectare de betterave ; 1 300 litres d'ester sont obtenus par hectare de colza. On estime de plus qu'un litre d'éthanol produit 75 % de gaz à effet de

serre de moins qu'un litre de produit pétrolier, tout point de la filière pris en compte.

Pour éviter les conflits avec les autres filières agricoles et ne pas compromettre les besoins alimentaires des populations, la seconde génération de biocarburants vise à exploiter au mieux les ressources végétales peu valorisées, notamment tous les débris. Le potentiel de collecte est estimé à 2,4 Gtep\*, soit la demande mondiale en carburant.

Le 5 décembre 2008, Dalkia a inauguré une plateforme de préparation de la biomasse à Velaine-en-Haye (Meurthe et Moselle). Elle permettra de rassembler les ressources de quatre départements lorrains et de livrer le combustible dans un rayon de 60 km. Superficie 21 000 m<sup>2</sup> - 80 000 t/an 1,6 million d'euros d'investissement.

*\*tep : tonne équivalent pétrole. Dans les transports, le pétrole domine actuellement le marché de l'énergie, et sert d'unité de mesure. Une tep est la quantité d'énergie obtenue en brûlant 1 tonne de pétrole, ce qui permettrait à une voiture de rouler 11 000 km environ.*

## BIOCARBURANTS

Deux pistes sont explorées : la voie biologique qui donne du bioéthanol, et la voie thermochimique qui produit directement du carburant biodiésel. Cette nouvelle filière doit s'inscrire dans une logique de développement durable tout en n'émettant pas, en bilan net, de gaz à effet de serre. Dans cette perspective, le CEA et l'Institut français du pétrole (IFP) conduisent un programme sur les biocarburants de 2<sup>e</sup> génération. Pour cela, les chercheurs étudient la voie thermochimique pour produire des biocarburants issus de biomasses constituées de bois, produits et résidus agricoles. Ces recherches sont inscrites dans le programme Biocarb dont l'objectif est de fournir, à partir de biomasse dite « lignocellulosique » (bois / paille, culture spécifique), un gaz de synthèse de haute pureté composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Ce gaz de synthèse permet ensuite de produire un biocarburant liquide de haute qualité pour les transports (synthèse Fischer-Tropsch de gazoil ou synthèse de méthanol).

Le concept de bio-raffinerie est utilisé pour montrer que la biomasse peut être valorisée en différents produits. Les gazéificateurs classiques conviennent aux petites puissances (10 MW maximum), produisent un gaz plutôt pauvre mais ne nécessitent pas d'apports énergétiques extérieurs. Les nouvelles technologies, dites réacteurs à lits fluidisés à haute température, permettent, par une **pyrolyse** rapide, de pro-

Décomposition thermique d'un matériau sous l'effet de la chaleur sans oxygène.

duire un gaz plus riche et sont plus adaptées à

## LANCEMENT D'UN PROJET DE PRODUCTION DE BIOCARBURANTS DE 2<sup>e</sup> GÉNÉRATION

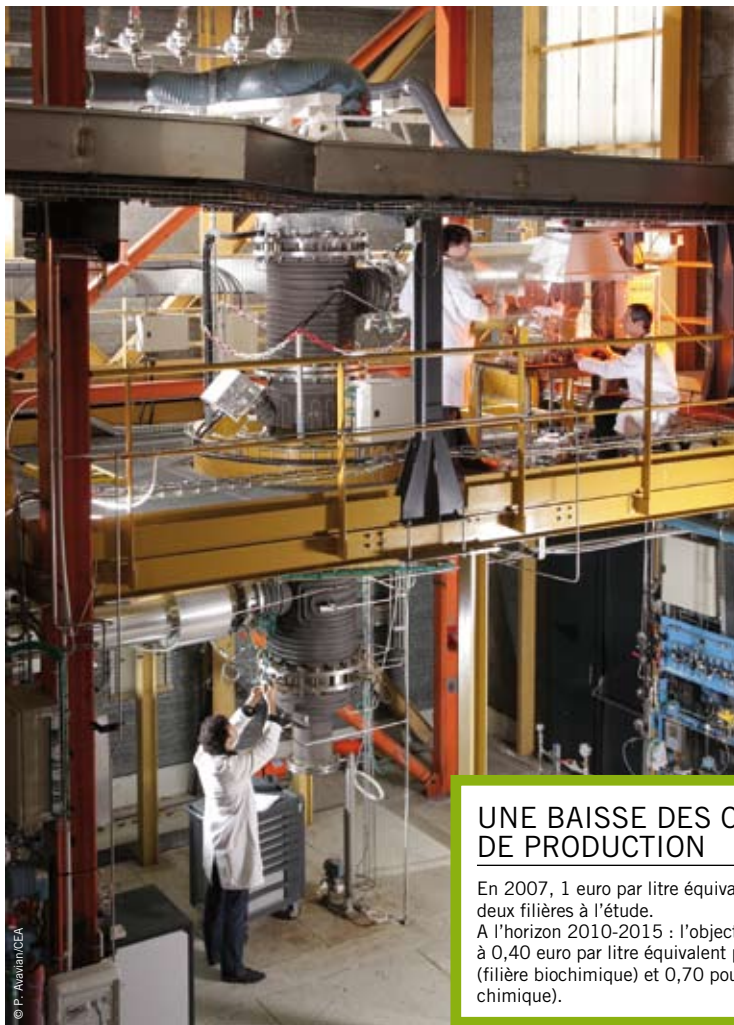


Le CEA et ses partenaires industriels et financiers lancent la première phase du projet de construction d'un démonstrateur BtL – « *Biomass to Liquid* » - de production de biocarburants de 2<sup>e</sup> génération, sur le site de Bure-Saudron, localisé à la limite des départements de la Haute-Marne et de la Meuse. L'objectif est de démontrer la faisabilité technique et économique d'une chaîne complète de production BtL en France, depuis la collecte de la biomasse jusqu'à la synthèse de carburant. L'introduction d'hydrogène dans le procédé pour optimiser le rendement massif constituera une première mondiale.

L'unité pilote sera la première du genre en France, rassemblant en une même installation les différents composants, ou « briques technologiques », de fabrication de ce biocarburant. Le démonstrateur expérimentera à une échelle pré-industrielle la filière BtL par voie « thermochimique » de production de biocarburant. La production attendue est de l'ordre de 23 000 t/an de biocarburant (diesel / kérosène / naphta). Cette filière permet la production d'un biocarburant de très haute qualité, tant du point de vue du fonctionnement des moteurs que de leurs émissions de polluants. Elle constitue l'une des réponses privilégiées par la France et l'Union européenne aux défis énergétiques des transports à l'horizon 2020.

### Les points forts de la filière BtL

- Gazéification qui valorise toute la plante (lignocellulose)
- Filière à fort potentiel : 10 à 18 Mtep suivant les options technologiques
- Utilisation des infrastructures actuelles de distribution
- Répond aux besoins du parc automobile européen (80 % diesel)
- Diesel Fischer-Tropsch de haute qualité et moins polluant que le diesel issu du pétrole (pas de soufre, pas d'aromatiques)

**INSTALLATION BIOCARB LFHT**

Cette installation permet d'acquies des connaissances sur la conduite et le contrôle d'un lit fluidisé haute température (LFHT) entre 800 et 1000°C, de tester des composants technologiques (alimentation en biomasse et filtration), d'étudier la gazéification à la vapeur de la biomasse et de caractériser le rendement du dispositif.

**UNE BAISSÉ DES COÛTS DE PRODUCTION**

En 2007, 1 euro par litre équivalent pétrole, pour les deux filières à l'étude.

A l'horizon 2010-2015 : l'objectif est de descendre à 0,40 euro par litre équivalent pétrole pour l'éthanol (filière biochimique) et 0,70 pour le BtL (filière thermo-chimique).

## “La France est en position favorable pour utiliser la biomasse à des fins énergétiques.”

des puissances élevées (10 à 200 MW). On recherche en particulier à maximiser la production de biocarburants à partir d'une quantité de biomasse donnée, notamment en étudiant les procédés avec apport d'énergie extérieure (hydrogène, électricité, chaleur). Ainsi, en utilisant de l'hydrogène produit avec de l'énergie nucléaire ou des énergies renouvelables, il est possible d'améliorer le bilan de l'opération, sans dégrader son bilan carbone.

L'Union européenne avait fixé comme objectif 2 % d'intégration de biocarburant dans les carburants actuels en 2005, et 5,75 % en 2010. Pour le moment, ils ne sont pas économiquement concurrentiels avec le pétrole ; mais l'augmentation constante des prix du brut et la prise en compte des paramètres externes (gaz à effet de serre, santé, impact sur l'emploi...) devraient réduire petit à petit cet écart et rendre les biocarburants compétitifs.

La France, avec sa faible densité de population comparée aux autres pays européens, est en position favorable pour utiliser la biomasse à des fins énergétiques. Actuellement de l'ordre de 10 Mtep/an, elle pourrait aller jusqu'à 25 Mtep sans modifier l'affectation des sols et en n'utilisant que la croissance annuelle moyenne des plantes. L'exploitation de la biomasse doit se faire dans des unités collectant dans un rayon qui ne doit pas dépasser la centaine de kilomètres. Il ne faut pas toucher aux forêts et prairies sous peine de libérer une partie du stock de carbone !



### MICROALGUES

Ces microalgues sont utilisées pour la production de biocarburants (biolipides).

A plus long terme, le CEA met en œuvre une R&D pour des biocarburants de troisième génération produits à partir de micro-organismes photosynthétiques, comme les micro-algues et les cyanobactéries.

Les équipes travaillent d'une part sur les capacités de synthèse de ces composés carbonés riches en énergie utilisables comme source de biocarburants (biolipides, bioéthanol...) et sur l'élaboration de catalyseurs alternatifs au platine pour des utilisations en pile à combustible (cf page 30).

La mise au point de ces procédés s'appuie sur des recherches fondamentales en chimie (catalyse biomimétique ou bio-inspirée) et en photosynthèse, mais également sur les nouvelles avancées de la biologie (génomique, protéomique, métabolomique, génétique, biologie des systèmes...). Plusieurs années seront nécessaires pour parvenir à une production industrielle.

### HÉLIOBIOTEC

La plateforme HéliBioTEC a été créée en 2008 dans le but de constituer à l'horizon 2011 un pôle de compétence à fort potentiel d'innovation sur la biotechnologie des micro-organismes photosynthétiques (micro-algues, bactéries) au service de la production de biocarburants (biohydrogène, biodiesel).



UNE MÊME RÉACTION CHIMIQUE PERMET DE PRODUIRE  
OU DE STOCKER DE L'ÉLECTRICITÉ. MAIS LES BATTERIES  
OU LES PILES UNIVERSELLES N'EXISTENT PAS ;  
À CHAQUE APPLICATION SA SOLUTION !

# Développer batteries et piles à combustible

A close-up photograph of a silicon wafer containing several microbatteries. The wafer is held in a circular holder, and the batteries are arranged in a grid pattern. The wafer is blue with yellow and grey patterns. The background is dark, and the lighting highlights the intricate details of the microbatteries.

## MICROBATTERIES LITHIUM

Elaborées sur wafer silicium,  
ici en cours de caractérisation  
électrochimique.

## À CHAQUE BATTERIE SON APPLICATION

Il est indispensable de stocker l'énergie électrique pour les applications nomades ou de transport. Par ailleurs, la bonne gestion des réseaux électriques du futur implique également de stocker l'électricité. Un des modes les plus souples est le stockage électrochimique dans les batteries.

La batterie universelle n'existe pas, mais doit s'adapter aux exigences de chaque application, aux contraintes matérielles, techniques et de sécurité.

Pour les téléphones et ordinateurs portables, c'est la quantité d'énergie stockée par unité de volume et de masse qui importe. On utilise du lithium, du cobalt et du graphite. Mais le cobalt est un matériel coûteux et ce type de batterie peut donner lieu à une surchauffe, ce qui en interdit l'usage pour l'automobile.

Pour cette application, les chercheurs s'orientent vers d'autres matériaux tels que les oxydes de manganèse et autres oxydes spinelles qui rendent les batteries plus performantes et plus sûres.

Structure cristalline commune à un groupe de minéraux, correspondant à un empilement cubique compact.

Un véhicule hybride présente des contraintes quelque peu différentes : la batterie est très sollicitée pour suivre le rythme d'une conduite en ville. Elle doit fournir rapidement le courant demandé et se recharger pendant le freinage. Dans ce cas, les électrodes sont à base de fer et de phosphates, comme le  $\text{LiFePO}_4$  (lithium fer phosphate), convenant à ce type d'applications dites de puissance. Depuis 2001, le CEA a déposé 4 brevets sur la synthèse du  $\text{LiFePO}_4$  dopé au bore, et a transféré en 2008 ce savoir-faire à la société belge Prayon.

Le CEA est partie prenante de la moitié des projets « véhicules routiers à faibles émissions de gaz à effet de serre » de l'Ademe.

Par exemple :

- EILISup avec Irisbus et EDF : bus hybride et autocar tout électrique
- Forewheel avec Michelin et Heuliez : démonstrateur de véhicule électrique
- DHRT2 avec Toyota, EDF et l'Ecole des Mines : véhicule hybride et convergence habitat solaire-transport
- Velecta avec l'Aixam et l'INRETS pour des quadricycles légers et lourds sans permis
- Hydrole avec PSA, Freescale, EDF pour un véhicule hybride à dominante électrique.



PROTOTYPE KART

Le projet PVE (Petit véhicule électrique) est une application de ces batteries.

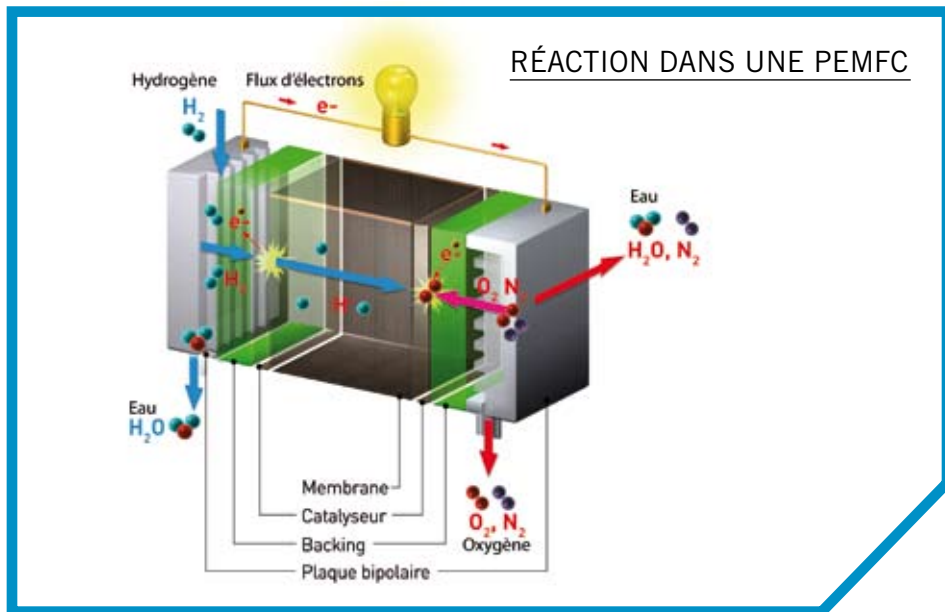
© ArtechmiqueCEA

## LE PREMIER PROTOTYPE FRANÇAIS POUR L'AUTOMOBILE DATE DE 2006



© P. Stroppa/CEA

Les recherches menées au CEA sur les PEMFC ont notamment été conduites dans le cadre d'un partenariat privilégié avec PSA Peugeot Citroën pour aboutir, début 2006, à la présentation du prototype GENEPAC. C'est la pile la plus puissante construite en Europe, 80 kW, elle bénéficie d'un très bon rapport puissance / compacité : 1,1 kW/kg et 1,5 kW/l.



## LES PILES À COMBUSTIBLE

Le principe de la pile à combustible est relativement simple : produire simultanément de l'électricité et de la chaleur en recombinaison électrochimiquement de l'oxygène et de l'hydrogène, avec de l'eau pour seul « rejet ». Il existe plusieurs types de piles à combustible (PAC) qui se différencient par leur **électrolyte**. Cet électrolyte définit la température de fonctionnement de la pile et, pour partie, son application.

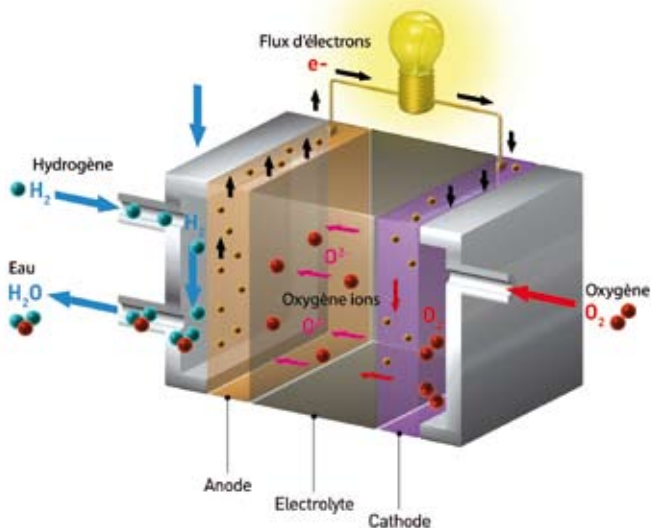
Élément chargé de véhiculer les ions entre les électrodes.

Les recherches du CEA portent sur les deux technologies les plus prometteuses de PAC : les piles à membranes échangeuses de protons (PEMFC, pour *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) et les piles à oxydes solides (SOFC, pour *Solid Oxide*

*Fuel Cell*). Leurs applications sont complémentaires et leurs contraintes très différentes.

Les PEMFC, fonctionnant à basse température, sont privilégiées pour les applications transports et nomades. A court terme, l'industrialisation des piles PEMFC se fera d'abord dans la téléphonie portable sous forme de micropiles, grâce aux faibles puissances requises et aux grandes séries de production permises. Le développement progressif de piles PEMFC permet d'équiper des générateurs de secours ou des flottes de petits véhicules à usage professionnel. À l'horizon 2020 ce sera le démarrage du déploiement dans l'automobile grand-public.

## RÉACTION DANS UNE SOFC



Les SOFC sont destinées quant à elles plutôt aux applications stationnaires en cogénération (électricité et chaleur) ou comme auxiliaires de puissance pour les transports. Plus tolérantes vis-à-vis du combustible et présentant de meilleurs rendements que la PEMFC, elles n'ont cependant pas encore atteint tous les objectifs technologiques (coût et durée de vie) nécessaires à leur développement à grande échelle, en raison notamment des très hautes températures impliquées (supérieures à 800°C). Les recherches menées répondent à plusieurs enjeux :

- Réduction du coût de la pile, en particulier du catalyseur.

Le coût de la pile demeure un obstacle majeur à sa large diffusion. Afin de réduire le coût du catalyseur en platine, les recherches portent sur l'utilisation de nanoparticules de platine, qui permet de diminuer significativement la charge en platine sans perte notable des performances électrochimiques. Le remplacement de la membrane Nafion® fait également l'objet d'études à partir de matériaux compétitifs.

Résine échangeuse d'ions fluorée, utilisée comme membrane électrolyte dans les piles à combustible.

Les objectifs sont d'atteindre 45 €/kW et 30 €/kW en 2015 (sur la base de 500 000 unités/an dans le marché de l'automobile grand public). Pour des marchés de niche, ces objectifs





## ALIMENTATION ÉLECTRIQUE D'UN VOILIER

En 2006, un voilier de plaisance a été équipé d'un groupe électrogène à pile à combustible de type PEMFC, appelé EPICEA, d'une puissance électrique de 2 kW. L'énergie embarquée est sept fois plus importante qu'avec des batteries traditionnelles.

"Zéro CO<sub>2</sub>" a été présenté en 2009. Ce bateau de 12 mètres est équipé d'un moteur électrique alimenté par une pile à combustible développée par l'Institut Liten du CEA, qui a en charge toute l'architecture électrique, c'est-à-dire la propulsion par moteur auxiliaire électrique sous 400 volts, l'électricité à bord en 12 V continu, le standard pour la navigation de plaisance, ou en 220 V alternatifs qui servira à alimenter les appareils de mesure.

sont moins ambitieux et l'on peut viser comme prix objectif 1 000 à 1 500 €/kW.

- **Augmentation de la durée de vie** et mise en conditions réelles d'utilisation.

Les piles ont aujourd'hui une durée limitée, entre 3 000 et 5 000 heures en fonction des applications.

Pour améliorer ces performances, 8 bancs de tests ont été mis à contribution et 16 000 heures de tests réalisées, à la fois en conditions opératoires normales (variations de température, pression, humidité, alimentation en gaz...) que dégradées.

Les chercheurs travaillent à la modélisation et à la caractérisation fine des éléments pouvant perturber le bon fonctionnement de la pile : mécanismes de dégradation de la membrane et du vieillissement des assemblages, effets de l'humidification, transferts...

## VECTEUR HYDROGÈNE

En termes d'énergie, l'hydrogène présente plusieurs avantages : il est très répandu sur Terre, combiné avec, par exemple, de l'oxygène pour former de l'eau (H<sub>2</sub>O) ou avec du carbone pour les hydrocarbures (HC), également dans la biomasse. Il est trois fois plus énergétique que les carburants classiques. Il est aussi « écologique » : il libère son énergie chimique par combustion, en produisant de la chaleur et de l'eau sans émettre de gaz à effet de serre.

En revanche, contrairement aux autres sources d'énergie (Soleil, pétrole, charbon, gaz), il n'existe pas dans la nature et il faut donc le synthétiser. L'hydrogène est un vecteur énergétique. Mais pour être compétitif par rapport aux autres sources d'énergie et contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique, l'hydrogène doit garantir l'absence de pollution à chaque étape : production, stockage, transport et distribution.

### • Production

L'hydrogène est un gaz couramment utilisé dans les industries chimiques, pétrolières et dans d'autres secteurs industriels (microélectronique, sidérurgie, spatial...). Actuellement, la quasi-totalité de cet hydrogène est produit par des procédés basés sur la décomposition d'hydrocarbures, **vaporeformage**, tous émetteurs de gaz à effet de serre. Seulement 4 % de cette production est issue de la décomposition de l'eau par électrolyse. Dans la perspective d'une production d'hydrogène sans émission de gaz à effet de serre, le CEA travaille sur des procédés thermochimiques, utilisant directement la chaleur de sources telles que la géothermie, le solaire à concentration ou l'électrolyse à haute température de vapeur d'eau couplée à une centrale nucléaire ou solaire à concentration. L'objectif est de baisser le coût de production de l'hydrogène à 2 €/kg.

Procédé de production d'hydrogène basé sur la dissociation de molécules carbonées (méthane, etc) en présence de vapeur d'eau et de chaleur.

Une autre voie d'étude, la photobiologie, permettrait la production d'hydrogène à partir de micro-algues et d'hydrogénases.

Le CEA a lancé en 2005 un programme BioH<sub>2</sub>, pour renforcer la recherche sur la production de bio-hydrogène. Deux axes principaux de recherche ont été abordés dans ce programme :

- Explorer les capacités des micro-organismes à produire de l'hydrogène, à partir d'eau et de soleil ;
- Développer, par une approche biomimétique, des catalyseurs pour la production photocatalytique d'hydrogène par conversion de l'énergie solaire.

### • Stockage

L'atome d'hydrogène est de très petite taille et le plus léger des éléments : un litre de bio-hydrogène (H<sub>2</sub>) pèse 90 milligrammes, soit le poids de 3 timbres poste. Sa dispersion dans l'atmosphère est extrêmement rapide en milieu non confiné. L'hydrogène sous forme gazeuse est inflammable et explosif. De ce fait, l'usage de l'hydrogène impose de garantir la sécurité de son utilisation et de son stockage.

Les chercheurs du CEA s'intéressent à deux modes de stockage de l'hydrogène :

- **Le stockage gazeux haute pression** s'effectue dans des conteneurs composites dont le **lîner** est en polymère, matériau léger, étanche au gaz et résistant aux fortes pressions. Ce type de réservoir permet d'éviter les problèmes d'usure et de poids rencontrés sur les réservoirs métalliques, qui les rendent difficilement intégrables à un véhicule.

Revêtement interne servant de barrière d'étanchéité à l'hydrogène.

## GECOPAC, UN FONCTIONNEMENT DE LONGUE DURÉE

Début 2008, une pile à combustible SOFC a fonctionné plus de 1 000 heures à 900°C en délivrant une puissance de 300 Watts. Ce résultat technologique a marqué une nouvelle étape dans le projet Gecopac dont l'objectif est de fabriquer un système prototype de cogénération à base d'une pile SOFC. Ce démonstrateur, à vocation pédagogique, a pour objectif d'expliquer le fonctionnement futur d'un système de cogénération domestique de quelques kWatts. En plus de sa performance, ce système présente l'avantage de récupérer l'hydrogène non utilisé lors du fonctionnement de la pile. Envoyé dans une chaudière où il sera brûlé, il augmentera le rendement énergétique du système.

## “L’hydrogène est trois fois plus énergétique que les carburants classiques.”

À l’état gazeux, l’hydrogène est volumineux : l’énergie délivrée par 4 litres d’essence, l’est par 10 m<sup>3</sup> d’hydrogène à la pression atmosphérique normale. Il faut donc le comprimer entre 350 et 700 bars pour qu’il puisse être transportable dans un volume raisonnable.

- Le **stockage basse pression** en phase solide consiste à absorber l’hydrogène dans des matériaux capables de le restituer à la demande et qui présentent des avantages de sûreté et de compacité ; par exemple, l’hydrure. Mais il reste un inconvénient majeur : le poids demeure important.

### ROTOMOULAGE, TRESSAGE ET BOBINAGE

Le stockage de l’hydrogène sous pression peut se faire dans deux types de réservoirs bobinés :

- réservoir composite (tenue à la pression) + vessie aluminium (pour l’étanchéité). Cette solution présente des problèmes de vieillissement, en cyclage.
- réservoir composite + vessie plastique ; un système

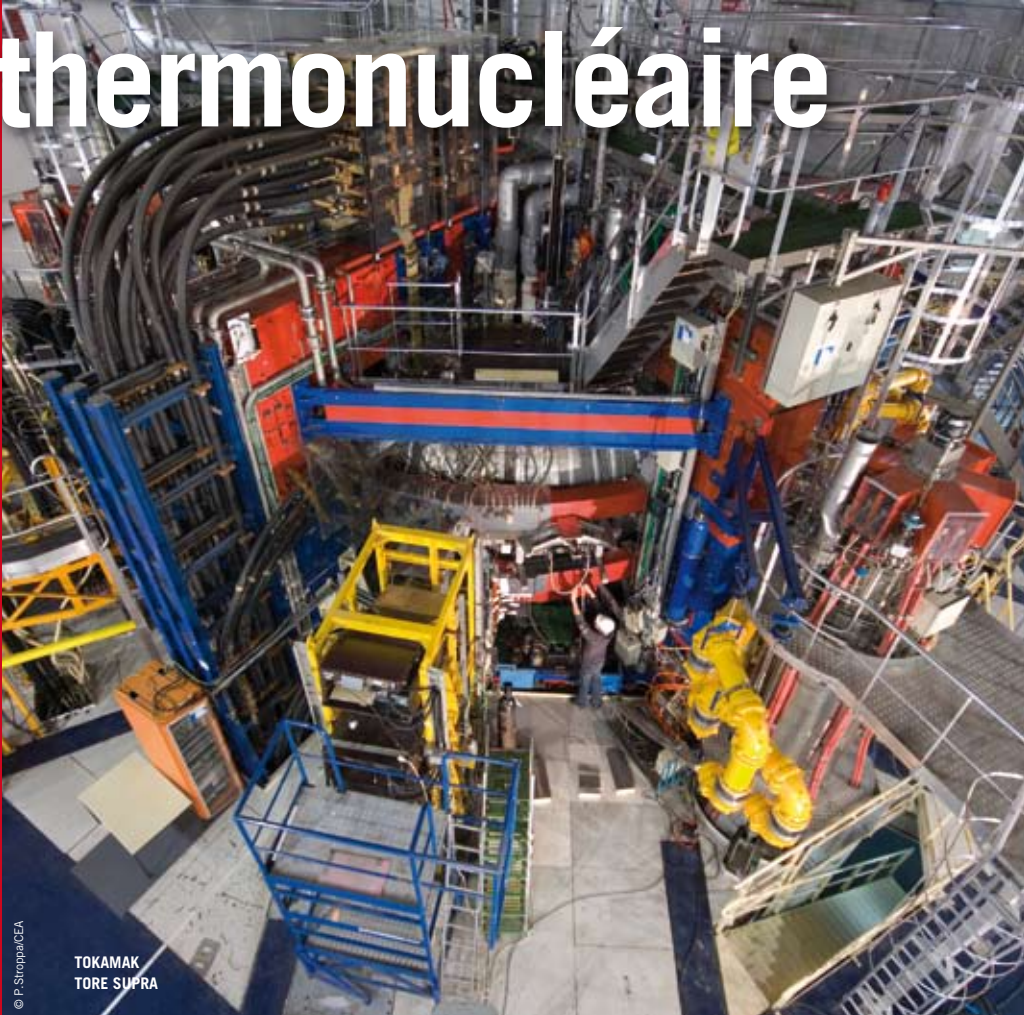
multicouches thermoplastique, par exemple de 5 à 8 mm d’épaisseur qui doit tenir à une pression de 300 à 700 bars, une température de 80°C et être barrière aux molécules d’hydrogène.

L’installation de tressage-bobinage réalise un empilement de couches, finalisant ainsi les réservoirs.



ON PEUT RÉCUPÉRER DE L'ÉNERGIE EN CASSANT UN GROS NOYAU D'ATOME EN DEUX, C'EST LE NUCLÉAIRE DE FISSION, OU EN FUSIONNANT DEUX NOYAUX LÉGERS, COMME LE DEUTÉRIUM ET LE TRITIUM.

# Fusion thermonucléaire



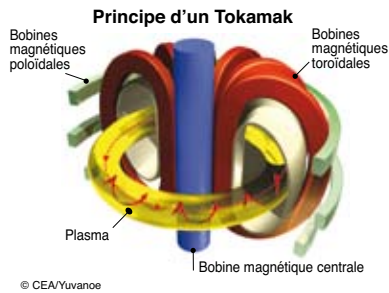
© P-Stroppa/CEA

TOKAMAK  
TORE SUPRA



La fusion thermonucléaire Deutérium-Tritium dégage une énergie considérable en partant de très peu de combustible : avec moins de deux kilogrammes par jour de deutérium et de tritium, on pourrait produire 1 000 MW d'électricité en continu, alors qu'il faudrait plus de 6 000 tonnes de combustibles pétroliers pour produire cette puissance avec une centrale thermique. Le combustible employé est très abondant : les réserves de deutérium sont infinies à l'échelle de la durée de vie de notre planète (elles sont contenues essentiellement dans l'eau de mer). Les réserves terrestres de lithium, nécessaires pour fabriquer le tritium, sont finies mais disponibles sur plusieurs milliers d'années. La mer en contient de grandes quantités (170 mg/l).

Autre atout de la fusion, c'est un mode de production d'énergie qui ne produit ni gaz à effet de serre ni déchets hautement radioactifs à vie longue. Enfin, la réaction ne peut conduire à l'emballement et peut se stopper immédiatement : il suffit d'interrompre l'alimentation en combustible ou le chauffage du plasma pour que tout s'arrête en quelques secondes. Mais, confiner de manière durable cet univers de turbulences que constitue un plasma chauffé à plus de 100 millions de degrés, apprivoiser cette réaction de manière à en faire un moyen de production d'électricité fiable, rentable et continu suppose de relever un certain nombre de défis. Si le chemin est encore long, on devrait pouvoir déployer des réacteurs industriels avant la fin du siècle moyennant un effort soutenu de R&D et d'industrialisation.



© CEA/Yuwanee

## QU'EST CE QU'UN TOKAMAK ?

### TOKAMAK

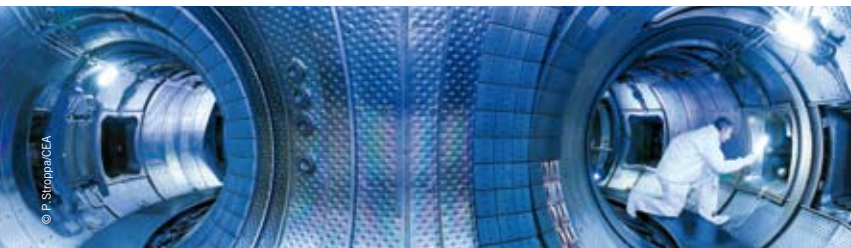
C'est un acronyme russe : toroidalnaïa kamera magnitnyï kakushkami, qui signifie « chambre toroïdale avec bobines magnétiques ». Cette enceinte en forme de tore capable de confiner un plasma à l'aide de champs magnétiques et ainsi de créer les conditions nécessaires aux réactions de fusion.

### PLASMA

Gaz constitué d'électrons et d'ions (atomes ayant perdu un ou plusieurs électrons). Sa température varie d'une dizaine de milliers de degrés à plusieurs centaines de millions de degrés, et sa densité est un million de fois plus faible que celle de l'air.

## DES ÉTUDES EN TOKAMAK

Les recherches au sein des tokamaks déjà existants à travers le monde se poursuivent et progressent. Le centre CEA de Cadarache dispose d'une importante plateforme scientifique et technologique de fusion. Cette plateforme réunit près de 270 chercheurs qui travaillent sur la physique fondamentale de la fusion, dans le domaine des plasmas, des matériaux, de la cryogénie ou encore des diagnostics, notamment sur l'installation Tore Supra.

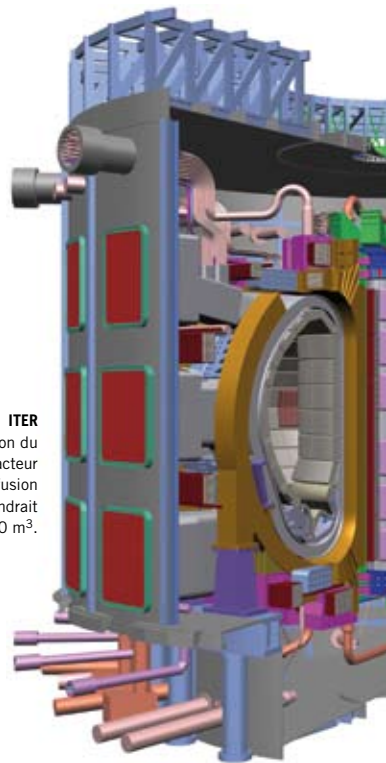


### TORE SUPRA

Vue de l'enceinte plasma.

## “Tore Supra et JET sont deux tokamaks européens, sur lesquels les expériences et les résultats sont riches d’enseignements.”

Premier grand tokamak supraconducteur de l’histoire, Tore Supra a permis d’ouvrir le champ des « décharges longues », dont il détient le record mondial, et de développer des concepts, des systèmes et des matériaux dont la finalité est de soutenir le mode de fonctionnement « continu » nécessaire à un réacteur électrogène. Mis en chantier en 1982 dans le cadre du contrat associant Euratom et le CEA, la machine a obtenu son premier plasma en 1988. Depuis, elle a produit plus de 40 000 décharges de plasma et ses dix-huit bobines supraconductrices ont fonctionné de façon très fiable. Le plasma n’est pas composé d’un mélange de deutérium-tritium mais uniquement de deutérium. En 2008, l’installation est entrée dans sa vingtième année de fonctionnement. A Culham en Grande Bretagne, le tokamak européen JET (Joint European Torus) est la plus grande installation de fusion au monde et la seule actuellement capable de fonctionner avec le mélange de combustible D+T. JET détient le record de puissance jamais obtenu : en 1997, il a produit 16 MW de puissance de fusion. Tore Supra et le JET sont à bien des égards des précurseurs et leur longévité est riche d’enseignements pour concevoir les prochaines installations.



**ITER**

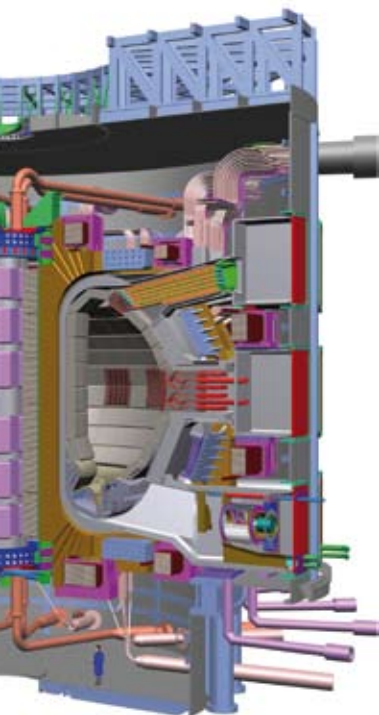
Représentation du Tokamak ITER, réacteur expérimental de fusion où le plasma atteindrait 800 m<sup>3</sup>.

## PROJET ITER

Dans l’éventail des choix énergétiques, la fusion s’impose donc comme une option majeure à long terme.

L’enjeu est tel que les recherches menées sur le sujet dépassent les frontières et c’est une grande partie de la communauté internationale qui s’engage dans la construction de l’installation ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) - réacteur expérimental de fusion thermonucléaire par confinement magnétique.

Il est prévu que la construction d’ITER prenne plusieurs années. Les physiciens disposeront



d'un anneau de plasma de 840 m<sup>3</sup>, dix fois plus volumineux que celui obtenu dans les plus grandes machines actuelles. Il s'agira de porter le plasma à quelque 150 millions de degrés pour y produire les réactions de fusion thermonucléaire.

Grâce à la puissance du supercalculateur Tera10 du CEA de Bruyères-le-Châtel, le code de calcul Gysela, développé en collaboration par des chercheurs du CEA et de l'Inria, a permis de modéliser les échanges à l'intérieur d'un plasma d'une taille voisine. À chaque pas de temps (de l'ordre de la microseconde), il a fallu calculer le nombre de particules, leur position et leur

## L'ENJEU D'ITER

La Chine, la Corée du Sud, les États-Unis, l'Inde, le Japon, la Russie et l'Union européenne sont solidairement engagés dans ce projet de plusieurs milliards d'euros. En 2005, la décision a été prise de construire ITER à Cadarache, en France. L'objectif selon ses concepteurs est de produire, en injectant une puissance de 50 MW de chauffage du plasma, une puissance thermique de fusion de 500 MW pendant 400 secondes.

L'enjeu : démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion par confinement magnétique pour produire de l'électricité à échelle industrielle d'ici la fin du siècle.

vitesse, sur chacun des dix milliards de points de maillage. Verdict : la chaleur devrait être suffisamment confinée au cœur du plasma, là où elle est utile pour que les réactions de fusion puissent se dérouler.

Les recherches menées dans cette installation devraient exiger une vingtaine d'années. Elles permettront d'acquérir les connaissances scientifiques et techniques suffisantes pour maîtriser la production d'une puissance crête de fusion d'environ 500 millions de watts pendant plusieurs centaines de secondes et d'environ 200 millions de watts pendant plusieurs dizaines de minutes, objectifs considérés comme des étapes clés pour envisager la construction d'un réacteur électrogène.

La mise en service d'un démonstrateur d'une puissance de 1 500 MW, d'ores et déjà baptisé DEMO, est prévue à l'horizon 2040. Étudier avec DEMO la faisabilité industrielle de la production d'électricité par la fusion nucléaire devrait alors demander une vingtaine d'années. La construction du premier prototype industriel, d'une puissance électrique de l'ordre de 1 500 gigawatts, peut donc être envisagée à l'horizon 2060 et conduire à un déploiement de réacteurs industriels aux alentours de 2070-2080.

- 1 → L'atome
- 2 → La radioactivité
- 3 → L'homme et les rayonnements
- 4 → L'énergie
- 5 → L'énergie nucléaire : fusion et fission
- 6 → Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- 7 → Le cycle du combustible nucléaire
- 8 → La microélectronique
- 9 → Le laser
- 10 → L'imagerie médicale
- 11 → L'astrophysique nucléaire
- 12 → L'hydrogène
- 13 → Le soleil
- 14 → Les déchets radioactifs
- 15 → Le climat
- 16 → La simulation numérique
- 17 → Les séismes
- 18 → Le nanomonde
- 19 → Energies du XXI<sup>e</sup> siècle

The CEA logo consists of the letters 'cea' in a stylized, lowercase, sans-serif font, enclosed within a square frame defined by horizontal lines at the top and bottom.

© Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 2010  
Direction de la communication  
Bâtiment Siège  
91191 Gif sur Yvette cedex - [www.cea.fr](http://www.cea.fr)

ISSN 1637-5408.

The 'cea Jeunes' logo features the word 'cea' in a bold, lowercase font with a small green leaf-like symbol above the 'e', followed by the word 'Jeunes' in a smaller, lowercase font below it. The entire logo is set against a white background with a thin black border.