



DOSSIER DE PRESSE



PRODUIRE DE L'ENERGIE SANS GAZ A EFFET DE SERRE : L'ACTION DU CEA

28 octobre 2008

CONTACT PRESSE : CEA / Service Information-Media

Marie Vandermersch Tél. : 01 64 50 17 16 - Marie.vandermersch@cea.fr

CEA Saclay / Siège
Direction de la Communication
Service Information-Média
91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél. : (33) 01 64 50 20 11
Fax : (33) 01 64 50 28 92
www.cea.fr/presse

Sommaire :

Produire de l'énergie sans gaz à effet de serre : l'action du CEA

- 3 Introduction**
- 4 Domestiquer l'énergie solaire**
 - 4 L'énergie solaire thermique
 - 4 L'énergie solaire thermodynamique (CSP)
 - 5 L'énergie solaire photovoltaïque
- 7 La filière Hydrogène**
 - 7 Production d'hydrogène
 - 8 Stockage de l'hydrogène
 - 8 Perfectionnement des systèmes de piles à combustible (PAC)
- 11 Les biocarburants de deuxième génération**
- 12 Vers un nucléaire durable**
 - 12 Fission : cap sur la quatrième génération
 - 14 La fusion thermonucléaire, l'autre voie pour un nucléaire du futur

Introduction :

Dans les prochaines décennies, le contexte énergétique et climatique est voué à se tendre de plus en plus. D'un côté, la croissance démographique et le développement nécessaire des pays émergents supposent une consommation d'énergie accrue ; de l'autre, la diminution des réserves d'énergies fossiles, les difficultés d'approvisionnement liées aux tensions géopolitiques et le réchauffement climatique imposent de trouver rapidement une alternative sûre et compétitive aux hydrocarbures. Dans son rapport annuel « *World Energy Outlook 2007* », l'Agence internationale de l'énergie (AIE) tire la sonnette d'alarme : les prévisions en termes d'émissions de gaz à effet de serre qui se dessinent à l'horizon 2030 sont plus pessimistes encore que celles de l'année précédente : les estimations tablent sur une augmentation des émissions de gaz à effet de serre de 57% (1,8% par an) faute de nouvelles mesures pour freiner la consommation d'énergie. Aussi est-il urgent d'agir si l'on veut que les concentrations de gaz à effet de serre se stabilisent à un niveau permettant d'éviter une interférence dangereuse avec le système climatique.

Pour répondre à ces enjeux, l'Europe a mis en place un ensemble d'objectifs ambitieux visant à réduire significativement ses émissions de gaz à effet de serre¹. Pour remplir ces objectifs, l'innovation technologique est incontournable. C'est dans cette optique que l'Europe a lancé, le 22 novembre 2007, un Plan Stratégique Européen pour les technologies énergétiques (Plan SET). Pour renforcer la coordination des différents acteurs de la R&D dans le domaine, l'Europe lance aujourd'hui l'Alliance, à laquelle participe le CEA.

Mettre au point de nouvelles solutions énergétiques compétitives, sûres et propres, en particulier non émettrices de gaz à effet de serre, est en effet l'un des grands axes de recherche du CEA. La R&D qu'il mène au quotidien dans ce domaine répond à plusieurs priorités définies dans le Plan SET.

Le CEA participe ainsi aux programmes internationaux de recherches sur les réacteurs et combustibles nucléaires du futur qui assureront une production à la fois plus économique, plus sûre et générant moins de déchets. Le CEA a ainsi été mandaté pour construire, à l'horizon 2020, un prototype de réacteur rapide de 4^e génération, défi très ambitieux vers un nucléaire durable et encore plus sûr. Le CEA conduit aussi des programmes sur l'impact sanitaire et environnemental de l'énergie nucléaire.

Acteur majeur en matière de nouvelles technologies de l'énergie, le CEA pilote la recherche française sur l'hydrogène et la pile à combustible. Il est également fortement impliqué au sein de l'INES (Institut National de l'Energie Solaire) dans le solaire photovoltaïque et thermique. Par ailleurs, il mène avec l'IFP des réflexions préliminaires sur la fabrication de biocarburants à partir de biomasse ligno-cellulosique. Grâce au travail de ses équipes, il contribue aux études sur la maîtrise de l'énergie.

La fusion thermonucléaire, dont la maîtrise pourrait permettre dans l'avenir de disposer d'une source quasi infinie d'énergie, est également au cœur de ses recherches. Le CEA est ainsi fortement impliqué dans le projet international du réacteur expérimental ITER.

¹ D'ici à 2020, l'Union Européenne vise d'une part une diminution de 20% des émissions de GES par rapport au niveau de 1990, et d'autre part une contribution des énergies renouvelables à hauteur de 20% dans la consommation finale d'énergie. Elle espère réduire d'ici 2050 ses émissions de GES de 60 à 80%

Domestiquer l'énergie solaire

→ *Défis technologiques du PLAN SET :*

- *Démontrer la maturité commerciale de la production d'électricité photovoltaïque à grande échelle et de l'énergie solaire concentrée ;*
- *Réaliser une avancée décisive sur le plan du rapport coût-efficacité des technologies de stockage de l'énergie ;*
- *Réaliser des avancées décisives en réunissant les conditions nécessaires à la recherche pour l'efficacité énergétique.*

Le bâtiment représente 46% de la consommation d'énergie finale en France, environ deux tiers pour le résidentiel et un tiers pour le tertiaire. Ce « poste » est responsable de 25% des émissions de CO₂ au niveau national, soit environ 120 millions de tonnes de CO₂. L'énergie solaire peut jouer un rôle capital pour une production locale d'électricité et de chaleur, notamment pour l'habitat individuel et collectif, où les besoins sont beaucoup moins massifs que dans l'industrie.

Actuellement, il existe trois voies d'utilisation de l'énergie solaire : le solaire thermique, qui transforme directement le rayonnement en chaleur, le solaire thermodynamique dit à concentration (Concentrating Solar Power - CSP), qui concentre la chaleur solaire vers un fluide caloporteur avant d'être converti en électricité, et le solaire photovoltaïque, qui transforme le rayonnement en électricité.

L'énergie solaire thermique

Le solaire thermique est aujourd'hui relativement bien maîtrisé en termes technologiques et économiques. L'énergie solaire thermique est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau ou des locaux. Le principe est le suivant : des capteurs thermiques 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 « caloporteur ») vers un réservoir de stockage d'énergie. 4 m² de capteurs thermiques permettent de répondre aux besoins en eau chaude d'une famille de quatre personnes et 10 m² assurent le chauffage d'une maison de 100 m² sous nos latitudes. Le CEA s'est particulièrement impliqué dans les années 70 dans les applications thermiques. Il a ainsi mis en œuvre dans le Pacifique, dès 1978, 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 orienté ses recherches vers l'énergie solaire photovoltaïque. Les activités de recherche sur le solaire thermique et photovoltaïque se développent aujourd'hui dans le cadre de l'INES (Institut National de l'Énergie Solaire) dont le CEA est un acteur majeur. Concrètement, une plateforme de R&D pour l'optimisation des systèmes solaires thermiques a été mise en place. Elle développe et caractérise de composants et de systèmes innovants.

L'énergie solaire thermodynamique (CSP)

L'énergie thermique du Soleil permet de produire de l'électricité par voie thermodynamique : la technologie la plus mature industriellement est la concentration par des miroirs cylindro-paraboliques. Ce type de miroirs, long d'une centaine de mètre, concentre sur un tube récepteur contenant un fluide

caloporteur la chaleur ; le fluide génère ensuite de la vapeur qui est turbinée pour produire de l'électricité. Il existe une autre technologie de centrales thermodynamiques dans lesquelles 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 MW. La plus grande centrale thermique au monde est située en Californie ; sa puissance électrique atteint 150 mégawatts. En France, un prototype de centrale, la centrale solaire Themis, a été construit sur le site de Targassonne, dans les Pyrénées, au début des années 1980. Elle fut exploitée de 1983 à 1986. Son rendement était de 2,5 MW. Des centrales industrielles ont été mises en service ces dernières années en Espagne, notamment près de Séville par la Société Abengoa. De nombreux projets sont en construction (plus de 200 MW en Espagne et les nouveaux projets représentent plus de 2000 MW). Le solaire CSP représente la technologie la plus probable pour le déploiement massif du solaire en Afrique du nord. Le CEA travaille sur certains points durs de la filière (échangeurs de chaleur, gestion, stockage de l'énergie).

L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque a l'avantage de convertir directement l'énergie du Soleil en électricité. Elle constitue une option prometteuse pour pallier la demande croissante de l'habitat à condition d'être économiquement compétitive. Tout l'enjeu des recherches actuelles est d'améliorer les coûts et les rendements des cellules photovoltaïques. Pendant longtemps, l'énergie fournie par une cellule photovoltaïque sur sa durée de vie ne suffisait pas à couvrir l'énergie qu'il avait fallu mobiliser pour la produire. Désormais, le rendement de conversion de l'énergie lumineuse d'une cellule photovoltaïque est de 15 à 17%, ce qui compense largement l'énergie mobilisée pour sa fabrication et permet de produire de l'électricité excédentaire. De fortes ruptures technologiques sont néanmoins indispensables pour réduire les coûts du Kilowatt photovoltaïque et augmenter les performances de nouvelles générations de cellules photovoltaïques.

Au CEA, les systèmes photovoltaïques font l'objet de recherches importantes depuis plus d'une dizaine d'années. Ces recherches visent prioritairement à mettre au point des technologies permettant d'améliorer la compétitivité économique de ces systèmes. Dans ce cadre, les chercheurs travaillent autour de trois axes :

- **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%, rendements qui ne peuvent être atteints à n'importe quel coût car la technologie ne serait alors plus économiquement viable pour les industriels. Il s'agit notamment de développer de nouveaux concepts de technologies photovoltaïques. Actuellement, 95% du marché repose sur la filière silicium. Le silicium utilisé doit être de qualité « électronique », c'est-à-dire de très grande pureté. Or le silicium est une matière première 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 onéreux, dégradables et faciles à manipuler, ceux-ci ouvrent de nouvelles voies dans la conception des cellules, en s'inscrivant dans une logique de développement durable.

- **Réduction du coût du stockage de l'énergie et miniaturisation des batteries** (par exemple pour les applications portables). Si l'électricité produite grâce au solaire photovoltaïque peut être connectée au réseau, elle peut aussi être produite, stockée et utilisée en un lieu unique. Cela fait de cette technologie une option particulièrement intéressante pour alimenter les lieux isolés. Dans ce cas, 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, notamment hors des périodes d'ensoleillement. Cela suppose d'améliorer les batteries actuelles pour que, dans la durée, le stockage soit meilleur.
- **Optimisation de la gestion de l'énergie dans l'habitat**, pour pouvoir à terme disposer d'habitats autonomes en énergie.

Le CEA développe également 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'origines thermique et photovoltaïque. L'ensemble de ces recherches sont conduites au sein de l'INES, créé en 2006 à Chambéry afin de regrouper la majorité des acteurs français de la recherche sur l'énergie solaire.

La filière hydrogène

→ *Défis technologiques du PLAN SET :*

- *Développer les technologies et créer les conditions permettant à l'industrie de commercialiser des véhicules équipés de piles à combustible à l'hydrogène ;*
- *Lancer sur le marché grand public des appareils et des systèmes de conversion énergétique et d'utilisation finale plus efficaces dans le secteur de la construction, les transports et l'industrie (polygénération, piles à combustible, etc.).*

Depuis plusieurs années, l'hydrogène est considéré comme le vecteur énergétique d'avenir pour les transports, mais également pour d'autres applications stationnaires. Élément le plus abondant de notre planète, essentiellement présent sous forme d'eau, l'hydrogène devrait permettre de stocker et de distribuer de façon souple l'énergie. Peu polluant et fortement énergétique (trois fois plus énergétique que les carburants classiques), il pourrait ainsi être utilisé directement (combustion classique) ou en utilisant des « piles à combustible » qui le convertiraient en électricité et en chaleur. Cependant, de nombreux développements technologiques restent à faire pour amener cette nouvelle filière énergétique à des niveaux de coût et de performances acceptables. Le CEA a choisi une approche globale de la filière hydrogène. Ses recherches portent donc sur toutes les étapes de cette filière : production, stockage, transport et distribution.

Production d'hydrogène

Sur Terre, la molécule d'hydrogène n'existe pas à l'état naturel : elle est toujours combinée à d'autres atomes comme l'oxygène (pour former de l'eau) ou comme le carbone (pour former, comme leur nom l'indique, les hydrocarbures). D'où la nécessité de le produire. Encore faut-il le produire sans émettre de gaz à effet de serre.

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 du méthane, oxydo-réduction des pétroles, gazéification du charbon), 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 à partir de la décomposition de l'eau, utilisant directement la chaleur de sources telles que la géothermie, le solaire à concentration ou la chaleur d'origine nucléaire.

Deux voies de recherche font actuellement l'objet d'efforts importants au CEA : l'électrolyse à haute température et les procédés thermochimiques. L'étude de ces deux voies prend en compte les sources de chaleur et de production d'électricité de masse d'origine nucléaire dont la France dispose et sur lesquelles le CEA travaille. L'un des objectifs essentiels, outre l'absence d'émission de gaz à effet de serre, tient dans la compétitivité d'une telle production, qui doit approcher de 2 €/kg d'hydrogène au regard des projections de coûts des modes actuels de production (en considérant, en parallèle, un objectif d'1 kg d'hydrogène/100 km pour les applications transports).

En parallèle, les recherches menées au CEA sur la biomasse ont en perspective le développement, à moyen terme, d'une production d'hydrogène complémentaire de celle d'origine nucléaire. Ces recherches sont inscrites dans le programme Biocarb, dont l'objectif est de fournir, à partir de biomasse lignocellulosique (bois / paille), un biogaz de haute pureté composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène.

Stockage de l'hydrogène

L'hydrogène sous forme gazeuse est inflammable et explosif. La molécule d'hydrogène étant de très petite taille, sa dispersion dans l'atmosphère est extrêmement rapide en milieu non confiné (d'où, du reste, des problèmes posés pour le stockage en termes de fuite). La réputation de dangerosité de l'hydrogène se justifie lorsqu'il est confiné, sans que cette dangerosité soit pour autant démesurée au regard d'autres vecteurs énergétiques. De ce fait, une diffusion large des technologies de l'hydrogène impose la garantie de leur sûreté, comme c'est aujourd'hui le cas dans leur utilisation à des fins industrielles (industrie chimique, raffinage).

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

- **Le stockage gazeux haute pression**, qui s'effectue dans des conteneurs composites dont le liner (le revêtement interne servant de barrière d'étanchéité à l'hydrogène) est en matériau polymère. Ce matériau présente l'intérêt d'être 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.
- **Le stockage basse pression en phase solide**, qui consiste à absorber l'hydrogène dans des matériaux capables de le restituer à la demande et qui présente des avantages de sûreté et de compacité.

Perfectionnement des systèmes de piles à combustible (PAC)

Le principe de la pile à combustible est relativement simple : produire simultanément de l'électricité et de la chaleur en recombinaison 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, l'élément chargé de véhiculer les ions. Cet électrolyte définit la température de fonctionnement de la pile et, de fait, son application.

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), dont les applications sont complémentaires et les contraintes très différentes. Les PEMFC, fonctionnant à basse température, sont privilégiées pour les applications transports et 'nomades'. Les SOFC sont quant à elles privilégiées pour les applications stationnaires en cogénération (électricité et chaleur) ou auxiliaires de puissance pour les transports.

D'une manière générale, on considère que les recherches sur les piles de type SOFC ont, en matière de maturité, dix ans de retard sur celles concernant les

piles de type PEMFC. Ces dernières correspondent notamment à l'utilisation de la PAC dans l'automobile. Toutefois, les obstacles techniques et économiques existants, et le nécessaire développement d'une filière de distribution de l'hydrogène ne permettent pas d'envisager de façon réaliste que l'automobile soit la première bénéficiaire de ces technologies.

A court terme, l'industrialisation de la PAC (de type PEMFC) se fera d'abord dans la téléphonie portable, grâce aux faibles puissances requises et aux grandes séries de production permises. Les chercheurs envisagent en parallèle le développement progressif de piles PEMFC pour équiper des générateurs de secours ou des flottes de petits véhicules à usage professionnel. L'industrialisation pour l'automobile demeure l'objectif final, mais la diffusion de cette technologie ne pourra se faire que progressivement, parallèlement au développement d'un environnement adapté. On retient plutôt l'horizon 2020 pour une diffusion significative de voitures individuelles fonctionnant grâce à une PAC.

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, et elle bénéficie d'un très bon rapport puissance / compacité : 1,1 kW/kg et 1,5 kW/L.

Les recherches menées depuis au CEA visent à répondre 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. Le catalyseur, en platine, en est le principal responsable. Le CEA-Liten étudie depuis deux ans le développement de nanoparticules catalytiques de platine par un procédé chimique spécifique, qui permet de diviser par deux 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. Les progrès accomplis ont permis de gagner un facteur 50 en 5 ans. Les objectifs du CEA sont de répondre aux attentes des marchés, concrètement d'atteindre les objectifs fixés par l'UE ou le DOE (Department of Energy) pour les Etats-Unis : pour les applications automobile, il s'agit de développer des composants, des piles ou des systèmes et des technologies de fabrication associées qui permettront d'atteindre 45\$/kW système en 2010 et 30\$/kW système en 2015 (sur la base de 500 000 unités/an).

Pour des marchés de niche, ces objectifs sont bien moins ambitieux et l'on peut viser comme prix objectif 1000 à 1500 €/kW système pour 2010.

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

Aujourd'hui, on atteint 90% du cahier des charges en matière de durée de vie de la pile et de résistance aux températures. Une grande campagne d'essais a permis de caractériser et d'améliorer les performances sur des monocellules et des piles. Au total, 8 bancs de tests de pile à combustible ont été mis à contribution et 16 000 heures de tests ont été réalisées, à la fois en conditions opératoires normales (variations de température, pression, humidité, alimentation en gaz...) et dégradées.

- *Compréhension du comportement mécanique de la pile et des réactions à l'environnement :*

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 membrane-électrode (AME), effets de l'humidification, transferts à l'interface AME...

Au Liten (Laboratoire d'innovations pour les technologies des énergies du CEA), des capteurs d'efforts ont été installés sur 3 PAC de 12 kW fonctionnant à différents régimes et ont livré des résultats cohérents avec la simulation numérique. Ces travaux doivent améliorer la compréhension de la mécanique des piles, peu étudiée alors qu'on pressent que son influence sur les performances et la durée de vie est importante. Ils seront complétés cette année par des essais sur table vibrante, afin de simuler un environnement automobile.

Une « Joint Technology Initiative » européenne pour accélérer la R&D sur l'hydrogène et les piles à combustible

Afin d'atteindre le plus rapidement possible la commercialisation des applications de l'hydrogène et des PAC, l'Europe a lancé, dès octobre 2007, un partenariat de recherche sans précédent, une 'Joint Technology Initiative' (JTI), dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustible. Cette initiative est le fruit d'un effort coordonné des directions générales Recherche, Transports, Energie et Environnement de la Commission, au sein du 7^e programme-cadre de recherche et développement technologique (PCRDT), de l'Industrie et de la Recherche. Un total de 940 M€ est attribué à la JTI sur les piles à combustible et l'hydrogène pour la période 2008 – 2013. L'Initiative technologique conjointe est un nouveau dispositif européen qui a pour but de réduire le délai d'introduction sur le marché des nouvelles technologies. Elle rassemble 65 industriels, 50 organismes publics de recherche de seize pays et la Commission européenne. Les 50 centres de recherche ayant rejoint pour l'heure cette initiative représentent plus de 1 700 chercheurs couvrant tous les domaines de recherche, développement et innovation de la filière hydrogène et PAC.

Le regroupement des acteurs de la recherche publique s'est fait au sein d'une association, N.ERGHY, créée en mars 2008, et dont la présidence est assurée par Paul Lucchese, directeur des Nouvelles technologies de l'énergie au CEA. L'objectif de ce groupe est d'accentuer les efforts de R&D européens vers l'innovation et le support à l'industrie. Cette étape constitue une avancée importante pour la participation des instituts de recherche et des universités européennes à l'Initiative technologique conjointe (JTI) pour les piles à combustible et l'hydrogène.

Les biocarburants de deuxième génération

→ *Défi technologique du PLAN SET : rendre les biocarburants de la deuxième génération concurrentiels par rapport aux combustibles fossiles.*

La biomasse constitue une ressource renouvelable permettant de produire des carburants de synthèse utilisables dans les moteurs traditionnels. Ces « biocarburants » sont actuellement majoritairement produits à partir de produits agricoles comme la betterave, le blé, la canne à sucre. Ils n'utilisent qu'une partie de la plante et donc ne valorisent pas totalement les cultures. Face à l'augmentation de la population et à ses besoins alimentaires, il apparaît indispensable de développer une nouvelle filière de biocarburants qui s'inscrive mieux dans une logique de développement durable, notamment en ne concurrençant pas les usages alimentaires de certaines plantes, 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^e génération. Pour cela, les chercheurs étudient la possibilité de produire par voie thermo-chimique des biocarburants issus de biomasses constituées de bois, produits et résidus agricoles (ex.paille). 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 biogaz de haute pureté composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Ce biogaz permet ensuite de produire un biocarburant liquide de haute qualité pour les transports. Le CEA cherche 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).

En parallèle, les recherches menées au CEA sur la biomasse ont en perspective le développement, à moyen terme, d'une production d'hydrogène complémentaire de celle d'origine nucléaire, l'hydrogène pouvant lui aussi être produit à partir de cette filière.

A plus long terme, le CEA travaille sur les procédés de 3^e génération de production de bio-huiles par les micro-algues, le bio hydrogène, soit par fermentation, photofermentation ou directement par photosynthèse et dissociation de l'eau. Il travaille également sur des systèmes photoélectrochimiques avec certaines parties des systèmes "bio'inspirés".

Vers un nucléaire durable

Fission : cap sur la quatrième génération

→ *Défis technologiques du PLAN SET :*

- *Maintenir la compétitivité des technologies de fission, ainsi que les solutions à long terme en matière de gestion des déchets ;*
- *Achever les préparatifs de la démonstration d'une nouvelle génération de réacteurs à fission pour une durabilité accrue (Génération IV)*

S'il est manifeste que toutes les sources d'énergie devront être mises à contribution pour répondre à la situation, le nucléaire paraît incontournable dans le « bouquet énergétique » de demain. Fiable et compétitif, il ne produit pas de gaz à effet de serre et permet d'assurer une production d'électricité massive et régulière. La communauté internationale est consciente des enjeux de l'énergie nucléaire à l'horizon 2020-2030. Ainsi, une dizaine de pays ont décidé de mettre en commun leurs efforts pour développer une nouvelle génération de systèmes². Créé en 2000, le Forum international Génération IV est l'initiative la plus marquante dans ce sens.

D'emblée, une forte convergence s'est affirmée sur les grands objectifs du programme Génération IV, même si chaque pays demeure par ailleurs libre de ses choix d'options et de programmes pour les systèmes du futur. Quatre objectifs principaux ont été définis pour caractériser les systèmes du futur qui doivent être à la fois :

- **durables** : c'est à dire économes des ressources naturelles et respectueux de l'environnement (en minimisant la production de déchets en termes de radio-toxicité, masse, puissance résiduelle, etc.). En effet, bien que le combustible nucléaire (l'uranium) ne connaisse pas les mêmes contraintes que le pétrole ou le gaz, ses réserves sont limitées à 250 années de consommation avec les systèmes utilisés actuellement. La technologie des réacteurs à neutrons rapides, au centre des recherches sur la génération IV, permettrait d'utiliser ces réserves sur plusieurs milliers d'années. De même, si les déchets produits par les centrales sont actuellement gérés avec les meilleures technologies disponibles, il est démontré qu'il est possible de réduire encore leur volume et leur toxicité. C'est également l'un des objectifs assignés aux recherches sur les réacteurs du futur.
- **économiques** : aux plans du coût d'investissement par kWe installé, du coût du combustible, du coût d'exploitation de l'installation et, par voie de conséquence, du coût de production par kWh qui doit être compétitif par rapport à celui d'autres sources d'énergies ;
- **sûrs et fiables** : avec une recherche de progrès par rapport aux réacteurs actuels, et en éliminant autant que possible les besoins d'évacuation de population à l'extérieur du site, quelles que soient la cause et la gravité de l'accident ;

² Par système, il faut entendre l'ensemble formé par les réacteurs et les cycles du combustible associés.

- **résistants vis-à-vis de la prolifération** et susceptibles d'être aisément protégés contre des agressions externes.

La diversité des besoins à couvrir et des contextes internationaux explique que l'on n'aboutisse pas à un unique système Génération IV, mais à un éventail de solutions sur lesquelles se concentrent désormais les efforts de R&D des pays membres du Forum. En 2002, six systèmes nucléaires ont été sélectionnés³, qui peuvent permettre des avancées notables en matière de développement énergétique durable, de compétitivité économique, de sûreté et fiabilité, ainsi que de résistance à la prolifération et aux agressions externes. Ces systèmes ont l'avantage d'autoriser également d'autres applications que la production d'électricité, telles que la production d'hydrogène, de chaleur pour l'industrie ou le dessalement de l'eau de mer.

La France, qui a pris en 2006 la présidence du Forum pour une durée de trois ans, s'engage à mener plus spécifiquement des recherches sur deux d'entre elles. Ainsi, un prototype de réacteur à neutrons rapides sera construit en 2020. Dès à présent, les activités de R&D menées au CEA visent à réunir tous les éléments techniques et technico-économiques qui permettront en 2012 de décider de la nature et du cahier des charges du prototype. Tout en contribuant à l'ensemble de la réflexion, le CEA a choisi de faire porter principalement ses efforts sur deux systèmes de réacteurs à neutrons rapides : le réacteur rapide refroidi au sodium (RNR-Na) et le réacteur rapide refroidi au gaz (RNR-G) – l'hélium en l'occurrence.

Une nouvelle plateforme Technologique

Une Plateforme Technologique pour l'Energie Nucléaire Durable (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, SNE-TP) a été lancée sous l'égide des Commissaires à la Recherche et à l'Energie le 21 septembre 2007 afin d'assurer le développement d'un nucléaire sûr et durable. A cette occasion, Philippe Pradel, Directeur de l'énergie nucléaire au CEA, a présenté le rapport de Vision (Vision Report) élaboré par plus d'une trentaine d'acteurs de la R&D nucléaire, venant de l'industrie, du monde de la recherche et de la sûreté, et du monde académique. Ce rapport, qui souligne la contribution de la fission nucléaire à la sécurité d'approvisionnement en énergie, la limitation des émissions de gaz à effet de serre et la compétitivité de la production électrique, propose également des feuilles de route de R&D pour les réacteurs de 2^e et 3^e génération, ainsi que pour les réacteurs de 4^e génération qui seront déployés d'ici quelques décennies. La nécessité d'améliorer l'éducation et la formation, ainsi que le besoin de nouvelles infrastructures de recherche, comme le réacteur européen Jules Horowitz en cours de construction au CEA, sont également soulignés.

³ les six systèmes sélectionnés sont le VHTR (Very High Temperature Reactor system), réacteur à très haute température (1000°C/1200°C), refroidi à l'hélium, dédié à la production d'hydrogène ou à la cogénération hydrogène/électricité ; le GFR (Gas-cooled Fast Reactor system) ou RNR gaz, réacteur à neutrons rapides à caloporteur hélium ; le SFR (Sodium-cooled Fast Reactor system) ou RNR Na, réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium ; le LFR (Lead-cooled Fast Reactor system), réacteur à neutrons rapides à caloporteur alliage de plomb ; le SCWR (SuperCritical Water-cooled Reactor System), réacteur à eau supercritique ; le MSR (Molten Salt Reactor system), réacteur à sels fondus.

La fusion thermonucléaire, l'autre voie pour un nucléaire du futur

→ Défi technologique du PLAN SET : achever la construction de l'installation de fusion ITER et associer rapidement l'industrie à la préparation des actions de démonstration

Dans l'éventail des choix énergétiques auxquels nous devons dès aujourd'hui procéder, la fusion thermonucléaire s'impose comme une option majeure. L'enjeu est tel que les recherches menées sur le sujet ont fait exploser les cadres nationaux et c'est une grande partie de la communauté internationale qui s'engage dans la construction de l'installation ITER. La Chine, la Corée du Sud, les Etats-Unis, l'Europe, l'Inde, le Japon et la Russie sont impliqués dans ce projet de dix milliards d'euros.

La fusion thermonucléaire a en effet l'avantage de produire en toute sécurité de l'énergie en grande quantité avec très peu de combustible : avec moins de deux kilogrammes par jour de deutérium et de tritium, on pourrait produire 1000 MW d'électricité en continu, alors qu'il faudrait plus de 6000 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 ; les réserves de lithium, nécessaires pour fabriquer le tritium, sont finies mais sont disponibles sur plusieurs milliers d'années à un coût économique acceptable.

Autre atout de la fusion, elle constitue un mode de production d'énergie relativement peu polluant : elle ne produit ni gaz à effet de serre ni déchets toxiques ou hautement radioactifs à vie longue. Enfin, elle implique une réaction qui ne peut conduire à l'emballement : les conditions requises pour la fusion thermonucléaire sont à ce point exigeantes que toute altération de l'un ou l'autre paramètre du système entraîne l'arrêt immédiat de la réaction. De plus, l'installation est alimentée en combustible en continu et ne fait intervenir que quelques grammes de deutérium et de tritium à la fois. Il suffit d'interrompre l'alimentation pour que la réaction s'arrête en une fraction de seconde.

Mais confiner de manière durable cet univers de turbulences que constitue un plasma chauffé à plus de 100 millions de degré, apprivoiser cette réaction de manière à en faire un moyen de production d'électricité fiable et rentable suppose de relever un certain nombre de défis de R&D. Si le chemin est encore long, il est raisonnable de penser que l'on assistera à un déploiement significatif de réacteurs industriels avant la fin de ce siècle, dans les années 2070-2080.

Il est prévu en effet que la construction d'ITER prenne dix ans. Les recherches nouvelles qu'autorisera cette installation devraient exiger une vingtaine d'années avant que l'on acquière les connaissances scientifiques et techniques suffisantes pour maîtriser de manière satisfaisante la production d'une puissance 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'ores et déjà baptisé « DEMO ») est prévue pour 2040 et son utilisation exigera sans doute à nouveau une vingtaine d'années. La construction du premier prototype industriel, dont la puissance électrique devrait être de l'ordre de 1500 gigawatts, ne peut donc être envisagée avant 2060 et conduire à un déploiement de réacteurs industriels avant 2070-2080.

D'ici la mise en fonctionnement d'ITER, vers 2016, les recherches au sein des tokamaks déjà existants à travers le monde se poursuivent et progressent. La France, à travers le CEA est fortement impliquée dans ces recherches. En effet, depuis de très nombreuses années, le CEA constitue, dans le cadre du traité

Euratom, le point d'entrée unique en France pour l'ensemble des activités de recherche dans ce domaine. Son expérience unique dans la physique et le contrôle des décharges longues ainsi que dans les technologies associées lui donne la capacité d'être présent sur de nombreux sujets stratégiques, soit en position dominante soit au sein d'associations avec des partenaires extérieurs (physique et ingénierie des plasmas). Le centre CEA de Cadarache dispose ainsi d'une importante plate-forme scientifique et technologique de fusion. Cette plate-forme réunit près de 350 chercheurs qui travaillent sur la physique fondamentale poursuivant des recherches dans le cadre du programme européen sur la fusion avec l'installation Tore Supra. En parallèle de leur soutien au projet Iter, les chercheurs du CEA poursuivent leurs recherches sur la fusion, notamment dans le domaine des plasmas, des matériaux, de la cryogénie ou encore de l'optique.