



FOCUS

L'ÉNERGIE

FOCUS

L'ÉNERGIE

Énergie et développement durable	4
Ressources	6
Conversions	10
Vecteurs énergétiques	16
Usages	20
Socio-économie	24
Stratégie et prospective	28



CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Contexte énergétique mondial

La maîtrise de la demande future d'énergie et des conditions d'approvisionnement constitue un enjeu politique majeur pour l'ensemble de la planète. Elle est rendue d'autant plus difficile que l'humanité doit faire face à un double défi. Celui de la satisfaction des besoins énergétiques d'une population mondiale qui croîtra encore au cours des prochaines décennies, et dont une large part aspire à un développement économique et social fondé sur une demande accrue d'énergie. Celui posé par la nécessaire diminution des émissions des gaz à effet de serre, inhérentes à l'utilisation des combustibles fossiles, et des émissions d'autres gaz polluants, qui menacent les équilibres climatiques et environnementaux de la Terre. C'est tout l'enjeu du développement durable, notion dans laquelle le mot de développement n'est pas moins important que l'idée de responsabilité vis-à-vis des générations futures qu'implique la notion de « durabilité », dans ses trois dimensions économique, sociale et environnementale.

Actuellement, deux milliards d'êtres humains n'ont accès qu'à des formes d'énergie « traditionnelles » liées à l'utilisation du bois et des déchets animaux. Dans le même temps, la consommation moyenne d'un Américain est de 14 MWh par an, celle d'un Européen de 6 MWh par an et celle d'un Chinois ou d'un Indien de l'ordre de 1 MWh par an. De plus, 85 % des besoins énergétiques sont aujourd'hui couverts par les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz), émetteurs de gaz à effet de serre. Alors même que les premières mesures de limitation des émissions prises dans le cadre du Protocole de Kyoto, qui visent un objectif moyen de 5 % de réduction entre 2008 et 2012 par rapport aux émissions de 1990, ne seront pas atteintes, la demande énergétique devrait pratiquement doubler en 2050 du fait notamment des pays en émergence, comme la Chine, l'Inde ou le Brésil, dont les principales réserves sont constituées de charbon.

Le problème des modes de production d'énergie et de leur répartition équitable est donc crucial pour l'humanité, et le développement durable implique dans ce cadre une approche qui doit viser d'une part à réduire la consommation d'énergie, d'autre part à substituer de nouvelles sources d'énergie aux énergies fossiles. Les modes de production dépendent de choix politiques directement influencés par la disponibilité et le coût de l'énergie, la croissance démographique et le développement économique, rendus d'autant plus difficiles que, l'histoire nous le montre, si la consommation d'énergie augmente avec le produit intérieur brut, ces deux quantités sont partiellement découplées et leur rapport varie largement d'un pays à l'autre.

La recherche et l'action du CNRS

Dès lors, la recherche dans le domaine de l'énergie est une composante fondamentale de toute politique de développement durable. Elle seule peut permettre de proposer des solutions technologiques conduisant à une approche renouvelée de l'utilisation des différentes sources d'énergie, sans exclusive *a priori* : énergies fossiles, énergies renouvelables, énergie nucléaire.

Elle doit aussi intégrer, dès l'amont, des recherches dans le domaine des sciences humaines et sociales, qui concerneront aussi bien l'analyse des risques, la prospective économique et les modes d'accès à l'énergie, que l'adaptabilité technique et l'acceptation sociale. Ce rôle des sciences humaines et sociales est d'autant plus important que nous ne disposons pas actuellement d'une référence universelle commune quant à la « valeur » que représente l'énergie pour les êtres humains et les sociétés.

Dès le premier choc pétrolier en 1973, le CNRS a entamé des recherches structurées sur l'énergie. Deux cibles ont été privilégiées par les programmes successifs (PIRDES, PIRSEM, ECOTECH, ECODEV) : le solaire thermique et photovoltaïque et l'optimisation des procédés pour améliorer l'efficacité énergétique. Une recherche importante a également été développée sur la combustion industrielle et sur les moteurs thermiques. De plus, un programme général (PACE) sur le traitement et le devenir des déchets radioactifs et sur les solutions innovantes dans le domaine des nouveaux réacteurs a été entrepris, en partenariat avec le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et les industriels concernés. Des avancées significatives tant scientifiques que technologiques ont été obtenues dans tous ces domaines.

Afin de répondre aux nouvelles exigences de la demande énergétique, le CNRS a engagé dès 2001 une vaste réflexion avec les organismes de recherche concernés par l'énergie, le ministère chargé de la Recherche et les industriels. Cette réflexion a donné naissance à un programme interdisciplinaire baptisé Énergie. Ce programme, développé dans ce fascicule, repose sur cinq thèmes principaux : nouvelles ressources (solaire et biomasse), conversions (nucléaire et traitement des déchets), vecteurs énergétiques (électricité, hydrogène, chaleur), usages (habitat, moteurs, piles à combustible), socio-économie. Une veille scientifique et technologique est naturellement maintenue dans les autres domaines.

La communauté scientifique a été structurée et organisée sur chacun de ces thèmes. Une centaine de chercheurs et d'enseignants chercheurs et autant de doctorants travaillent sur chaque axe. Par une avancée des connaissances scientifiques et technologiques, l'objectif est de surmonter les difficultés actuelles, d'imaginer de nouveaux concepts et de rendre les filières du futur acceptables. Le coût de l'énergie est un problème majeur quelle que soit sa source, pour les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), mais surtout pour les pays en développement. Pour le rendre satisfaisant, le CNRS doit travailler en partenariat avec les industriels, leur proposer de nouvelles potentialités et accompagner leur recherche et développement une fois les marchés créés. C'est en effet par une action concertée entre les organismes de recherche et l'industrie que s'ouvriront les marchés répondant aux besoins des populations, pour lesquelles la survie passe par un partage des savoirs et des technologies. Le CNRS sera l'un des premiers acteurs de l'ambitieux programme national et européen qui se prépare.

Contexte et problématique

Les sources d'énergie, ou énergies primaires, se présentent sous différentes formes : combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), énergies mécaniques (hydraulique, éolienne, vagues/marée), énergie rayonnante (solaire), enfin énergie nucléaire. L'approvisionnement mondial (75 % d'origine fossile, 10 % à partir de la biomasse et des énergies renouvelables, 15 % sous forme d'électricité d'origine hydraulique et nucléaire) deviendra critique dans les trente à cinquante années à venir, surtout à partir des combustibles fossiles. Or, ceux-ci sont largement responsables de la production de CO₂ relargué dans l'atmosphère, et du changement induit sur le climat. La société est donc confrontée à la nécessité de substituer des énergies renouvelables non polluantes aux ressources fossiles.

Certaines énergies renouvelables (éolienne, hydraulique) sont déjà matures et ne nécessitent plus véritablement de recherche amont, mais une veille technologique. Au-delà du développement à soutenir pour l'exploitation de ces énergies renouvelables, et dans une perspective de développement durable et de protection de l'environnement, les efforts de recherche se portent sur la production d'électricité par voie photovoltaïque, sur l'exploitation de la biomasse et sur la géothermie, qui présentent les plus gros verrous scientifiques et technologiques à lever.

Le marché de l'électricité photovoltaïque présente de forts taux de croissance (35 % par an), malgré des coûts relativement élevés et des performances encore nettement améliorables. Le CNRS s'implique surtout dans des recherches sur la filière couches minces et sur les filières innovantes comme les cellules organiques.

L'exploitation de la biomasse par pyrolyse et gazéification relève d'une conversion thermochimique. Elle doit être améliorée pour viser une haute qualité de la gazéification de la biomasse, dans l'objectif de la production d'un gaz de synthèse de qualité « biocarburant-hydrogène ». La filière enzymatique et microbiologique de transformation de la biomasse par voie humide est l'autre approche développée par le CNRS. Les recherches, sur les filières biocarburant/bioéthanol à court terme, biodiesels à moyen terme, sont menées en parallèle avec celles sur la bioproduction d'hydrogène.

Photovoltaïque et solaire thermique

L'énergie d'origine photovoltaïque, basée sur la conversion du rayonnement solaire en électricité, est considérée comme stratégique dans une perspective de développement durable. De ce fait, il est très important de maintenir, et même d'amplifier non seulement les mesures de stimulation du marché mais aussi l'effort de recherche et développement qui lui est consacré. Le CNRS initie des activités de recherche sur des matériaux existants ou émergents et accompagne également le développement technologique des entreprises françaises du photovoltaïque.

L'électricité solaire d'aujourd'hui...

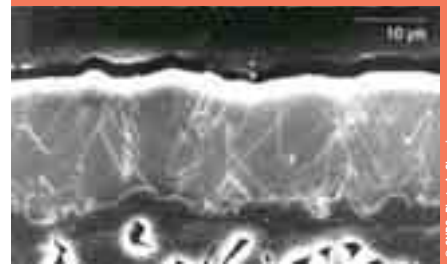
Afin de rendre moins chères et plus efficaces les technologies existantes à base de plaquettes en silicium cristallin, des chercheurs du CNRS travaillent sur les phénomènes de diffusion d'impuretés, de purification des matériaux et de passivation des défauts structuraux. Le but ultime est de faciliter l'intégration des composants photovoltaïques dans les réseaux électriques, à un coût visé de 0,10 €/kWh. Un certain nombre de procédés ont déjà pu être transférés à l'industrie. Pour le futur, l'enjeu est d'obtenir des rendements de conversion des cellules de l'ordre de 18 à 20 % en utilisant efficacement les matières premières, dans des procédés mettant l'accent sur des plaques minces (< 100 µm d'épaisseur).

... et de demain

Des alternatives prometteuses, étudiées par les laboratoires du CNRS dans l'optique d'un développement industriel, concernent l'utilisation de couches minces de matériaux semi-conducteurs (silicium cristallin et amorphe, chalcogénures) sur différents supports (verre, métal, céramique). Les recherches portent sur la cristallogénèse, les propriétés de transports et la fabrication de cellules test. L'utilisation de matériaux organiques à base de polymères et à très faibles coûts est également considérée dans le domaine de la conversion photovoltaïque. Les jonctions basées sur des films polymères conjugués (polythiophène, polyacétylène...) combinés avec des réseaux interconnectés de dérivés de fullerène se sont révélées prometteuses, nécessitant des investigations supplémentaires tant pour la compréhension fondamentale que pour le développement du composant photovoltaïque.

Conversion du rayonnement solaire en chaleur

Le solaire thermique suscite un regain d'intérêt grâce au développement de nouvelles générations de capteurs basse température plus efficaces. Ils permettent notamment aux capteurs photovoltaïques auxquels ils sont parfois associés un rendement supérieur de conversion du rayonnement en électricité ou en chaleur. La filière électricité solaire à haute température vit également un renouveau : des équipes du CNRS réfléchissent à de nouveaux cycles de transport et de stockage de la chaleur pour sa conversion en électricité. L'utilisation des instruments solaires à concentration leur permet aussi de tester des cycles thermo-chimiques de production d'hydrogène, ainsi que l'électrolyse à haute température de l'eau.



Film de 20 µm d'épaisseur de silicium sur substrat céramique. Gain de matière (faible coût) et très grande surface (pour toiture) sont les principaux atouts des cellules solaires en couches minces.

© CNRS - Photo A. Staud.



Installation de modules Photowatt dans le cadre du projet HipHip.

© Photowatt.

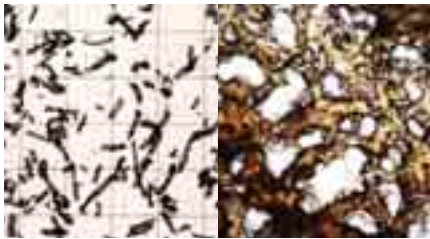


Four solaire d'Odeillo, qui concentre du rayonnement solaire.

© CNRS Photothèque - Photo A. Gomin.

Pyrolyse - gazéification de la biomasse pour l'énergie et la chimie

La biomasse, source d'énergie renouvelable abondante et ne conduisant à aucune accumulation de gaz à effet de serre, peut être transformée à haute température par diverses filières de pyrolyse - gazéification. La matière végétale est alors transformée en produits, notamment gazeux, qui peuvent être utilisés pour la production de chaleur, d'électricité, de carburants de substitution ou d'hydrogène. Le développement industriel futur de ces technologies nécessite des actions de recherche couvrant l'ensemble de la chaîne, depuis la production de biomasse jusqu'à l'utilisation énergétique en aval.



© CNRS, Photo J. Lédé.

1/ Particules de cellulose vierges.
2/ Particules de cellulose exposées durant 1/10^e de seconde à un flux de chaleur intense. La phase liquide formée conduit à leur agglomération. Ce phénomène doit être pris en compte lors de la conception de réacteurs.



© CNRS, Photo J. Lédé.

Procédé de pyrolyse rapide de la biomasse. Le réacteur cyclone utilisé, d'un volume de 0,5 litre, permet de transformer 1 kg de sciure de bois à l'heure, en gaz ou en huile de pyrolyse.



© CNRS, Photo J. Lédé.

Réacteur dans lequel des pastilles de cellulose ou de lignine sont soumises à de brefs flux de chaleur contrôlés.

Processus de dégradation thermique de la biomasse

La composition et la structure de la biomasse sont très complexes et dépendent fortement de sa nature (forêts, cultures...). Il en résulte des réactivités variables qu'il convient de mieux connaître. Des équipes CNRS s'attachent à comprendre les mécanismes intimes de pyrolyse des éléments constitutifs de la biomasse (cellulose, lignine, hémicellulose). Les difficultés proviennent des couplages forts existant entre les processus chimiques et le chauffage (lent ou rapide), la nature et l'état de la biomasse (taille, humidité, composition). L'objectif de ces recherches est de contrôler le comportement thermique de biomasses de diverses origines, en termes de composition des produits, notamment gazeux.

Réacteurs haute température et propreté des effluents

Ces transformations sont mises en œuvre dans des réacteurs haute température où les réactions primaires précédemment décrites sont suivies de processus secondaires dont l'importance dépend des conditions de fonctionnement et du type de réacteur : hydrodynamique, transferts de chaleur et de matière, capacité. En outre, les effluents doivent contenir un minimum d'impuretés au regard de leurs utilisations finales. Les compétences des équipes du CNRS en génie des procédés sont mises à profit pour étudier les réacteurs les mieux adaptés à cette matière première particulière qu'est la biomasse. La nécessité de purifier les produits suscite également des recherches dans le domaine du craquage de sous-produits (goudrons), ainsi que de l'élimination efficace des poussières, aérosols et alcalins. L'objectif de tous ces travaux est le dimensionnement, à l'échelle industrielle, de procédés propres et sélectifs, par le biais de l'établissement de lois d'extrapolation fiables.

Maîtrise et rentabilité des procédés

La démarche doit intégrer l'ensemble des étapes de chaque filière allant de la ressource (biomasse) à l'utilisation finale des effluents. Il est indispensable d'aboutir à des solutions adaptées aux couplages optimaux entre nature, disponibilité, transport et stockage de la biomasse, capacité de traitement du procédé (unités locales ou centralisées), optimisation énergétique, type d'utilisation visée en aval (chaleur, électricité, carburants, chimie), données géopolitiques et socio-économiques.

Biocarburants

Issus d'une matière première renouvelable qui constitue un « puits » de CO₂ par photosynthèse, les biocarburants contribuent à la lutte contre les gaz à effet de serre. L'apport de biocarburants pourra être réalisé à court et moyen terme par deux filières : le bioéthanol (essence) et les esters méthyliques (diesel). À plus long terme, la bioproduction d'hydrogène est une voie prometteuse dans laquelle le CNRS a déjà engagé des recherches.

Filières bioéthanol et esters méthyliques

Ces filières ont d'importantes marges de progrès. Les recherches menées par le CNRS sur la filière bioéthanol concernent plus particulièrement l'élargissement du spectre des sucres fermentescibles en éthanol, l'utilisation de nouvelles matières premières et la conception et la production de biocatalyseurs plus performants. Cette approche de physiologie moléculaire et de génie microbiologique permettra au micro-organisme producteur d'éthanol, en général la levure, d'atteindre de meilleures performances. Les recherches concernant les biodiesels, dont certains (esters méthyliques de colza) sont déjà commercialisés, évoluent actuellement vers des voies de transformation enzymatique alternatives aux voies chimiques et vers la mise au point de plantes oléoprotéagineuses modulant la composition lipidique, qui doit être adaptée à une meilleure qualité de carburant.

Bioproduction d'hydrogène

Les algues sont capables de produire de l'hydrogène à partir de la photodissociation de l'eau. Cette réaction est cependant limitée en raison de la grande sensibilité des hydrogénases vis-à-vis de l'oxygène. Deux voies sont explorées pour pallier cet inconvénient. Premièrement, la séparation dans le temps (et/ou dans l'espace) de la production d'hydrogène et de la photolyse de l'eau. Deuxièmement, la création d'hydrogénases insensibles à l'oxygène par mutagenèse dirigée. Un tel but ne sera atteint que par une meilleure connaissance de la structure et du fonctionnement de l'enzyme (cristallographie). La compréhension des relations structure/fonction de l'hydrogénase peut par ailleurs permettre la conception de biocatalyseurs et de catalyseurs artificiels par une approche biomimétique.

Potentialités

Le nouvel environnement réglementaire prévoit au plan européen une augmentation de la mise sur le marché de biocarburants, leur part devant atteindre 5,75 % du marché d'ici 2010. La satisfaction de cette recommandation entraînera un besoin de biocarburants, en France de 3 Mtep et en Europe de 18 Mtep (Mtep : Méga tonne équivalent pétrole). L'importance en France des ressources « biomasse » issues de l'agriculture ou de la forêt permettrait de consacrer une surface agricole dédiée aux cultures énergétiques de 4 millions d'hectares, contribuant à produire 10 Mtep par an. Ce scénario, envisageable, entraînerait une économie d'émission de CO₂ de 24 millions de tonnes par rapport à l'utilisation d'une énergie fossile.



© CNRS Photothèque - Photo Y. Ramlier.

Les céréales, nouvelles matières premières pour produire les carburants du futur.



© CNRS - Photo C. Jouve.

Pilote de laboratoire de production de bioéthanol.



© CNRS - Photo L. Benhabib.

Levures productrices d'éthanol en croissance.

Contexte et problématique

Dans l'optique de leur utilisation finale, les énergies primaires nécessitent des conversions (en une forme d'énergie différente) ou des transformations (évolution de la même forme d'énergie). Sont principalement impliquées dans ces conversions la combustion des ressources fossiles et des déchets ainsi que la fission nucléaire : la chaleur ainsi produite alimente des turbines pour la production d'électricité. Les échangeurs thermiques sont nécessaires pour l'extraction de la chaleur du cœur des réacteurs et pour son transfert vers les turbines. Objet d'étude pluridisciplinaire, ils sont étudiés depuis longtemps au CNRS dans le cadre de recherches génériques. Ils sont l'une des clés économiques des procédés et la recherche est orientée vers les échangeurs multifonctionnels intégrant de nouveaux matériaux.

La fission nucléaire, qui ne provoque pas d'émission de gaz à effet de serre, produit en revanche des déchets radioactifs dont le traitement et le stockage ultime sont nécessaires. Dans le cadre du programme sur l'aval du cycle électronucléaire (PACE), le CNRS développe des solutions susceptibles d'accroître la destruction des déchets ainsi que la sûreté de leur stockage. L'organisme travaille également sur de nouveaux modes de production dans le futur de l'énergie nucléaire (filiales nucléaires moins polluantes) et il accompagne le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) sur le projet de fusion thermonucléaire ITER.

La conversion de l'énergie par combustion s'effectue avec des efficacités souvent faibles impliquant la production de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4) et de gaz polluants, et le rejet de forts contenus énergétiques sous forme de chaleur, qu'il faut impérativement recycler. L'intégration optimale des procédés conduit à la recherche de la maximisation de l'énergie utile ou de concepts de co-production. Aussi des critères basés sur la quantité et la qualité des énergies mises en œuvre sont-ils développés par l'école de thermodynamique du CNRS pour déterminer l'efficacité exergétique, qui est un critère d'analyse bien plus précis que l'efficacité énergétique. Le CNRS favorise le développement de ces procédés d'avenir avec deux impératifs : la minimisation de la production des gaz à effet de serre ainsi que leur destruction à la source ou leur stockage.

Entreposage et stockage des déchets

À l'incitation de la loi Bataille sur la gestion des déchets nucléaires, le CNRS a mis sur pied le programme interdisciplinaire PACE, consacré aux recherches sur l'aval du cycle électronucléaire. Celles-ci visent à réduire l'impact sanitaire et environnemental des déchets nucléaires. Une partie des travaux vise à proposer des solutions susceptibles d'accroître la sûreté de l'entreposage de longue durée (recherche sur les matériaux) ou du stockage des déchets nucléaires (géosciences).

Entreposage et stockage des déchets nucléaires

Aucun procédé de transmutation ne réduira à zéro le volume des déchets, inévitables dans tout procédé industriel. Leur gestion moderne passera par la séparation poussée des éléments radiotoxiques (plutonium et éléments lourds, iode et césium) plus ou moins mobiles, résultant du phénomène de fission nucléaire. Les équipes du CNRS contribuent à la recherche de composés chimiques capables d'extraire sélectivement ces éléments du combustible irradié, pour en réaliser soit le stockage spécifique, soit la transmutation. En s'aidant de l'étude d'analogues naturels, elles participent à la compréhension des mécanismes de sorption de ces éléments sur des solides, ou de leur relâchement et de leur migration dans la géosphère et la biosphère. Elles mettent au point et évaluent de nouveaux composés solides dont les propriétés de confinement ne seront pas détruites, à long terme, par la radioactivité et la température élevée qui en résultent.

Stockage en formations géologiques profondes

Les équipes du CNRS accompagnent les travaux de forçage (jusqu'à plus de 500 m) des puits du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Dans ce cas, on se fie au matériau géologique pour assurer le confinement des éléments radioactifs. Le laboratoire doit étudier les conditions géomécaniques, géophysiques et géochimiques qui pourront être celles d'un stockage de déchets radioactifs en couches géologiques profondes (ici, l'argile). Le travail du CNRS consiste à relever l'état initial du site, la nature et l'état des roches traversées, à reconnaître et caractériser la zone endommagée, en évaluer les capacités de rétention et les propriétés de cicatrisation d'une part, et l'absence de fracturation d'autre part. Ces caractéristiques dépendent largement de la présence et des propriétés de l'eau au voisinage du site, dont l'histoire à l'échelle géologique est fournie par les analyses isotopiques des eaux interstitielles. La difficulté à recueillir les eaux souterraines, liée à la très faible perméabilité des argiles du site, rend indispensable le développement de techniques spécifiques. La connaissance de la porosité et de la perméabilité de la zone concernée donne des indications précieuses sur d'éventuelles possibilités de migration des radioéléments hors du site. Les perturbations apportées par le forçage des puits sont identifiées, suivies et quantifiées. Enfin, l'absence de faille et de toute sismicité dans un site prévu pour retenir les déchets radioactifs sur des échelles de temps atteignant la centaine de milliers d'années doit être établie.



© CNRS/INSU, Photo J.-M. Montel.

La monazite est un minéral de terres rares (analogue naturel), qui contient couramment du thorium ou de l'uranium. Ses grains se comportent comme un système parfaitement étanche pour ces noyaux, en dépit de l'érosion et du transport qu'ils ont subi.



© Andra.

Sur le site de Meuse/Haute-Marne, les dispositifs de forçage des deux puits.

Traitement des déchets

Un des axes de la loi Bataille recommande de chercher des procédés de transmutation des déchets radioactifs. Il s'agit de transformer, en réacteur, des éléments sans grande valeur énergétique et dont la période radioactive peut atteindre des dizaines de milliers d'années en éléments de durée de demi-vie beaucoup plus courte, dont la radiotoxicité sera plus facilement gérable. Ces recherches concernent le deuxième volet du programme PACE.



© I.P.N. Orsay.
Composant d'un accélérateur moderne : cavité supraconductrice en niobium. L'importance de la propreté de surface explique le travail en salle blanche.



© CEA.
L'accélérateur GENEPI, à droite, produit à l'extrémité du tuyau, au centre du combustible (en bleu), des impulsions de neutrons. C'est un moyen d'étude de dispositifs sous-critiques.

L'incinération des déchets...

Le fonctionnement actuel des réacteurs nucléaires repose sur la fission de l'uranium 235, présent à 0,7 % dans l'uranium naturel. La production d'énergie s'accompagne inévitablement de celle d'éléments radioactifs et radiotoxiques. À long terme, et schématiquement, les plus dangereux d'entre eux sont les isotopes du plutonium, et ceux du neptunium, de l'américium et du curium, trois éléments appelés actinides mineurs. Leur durée de demi-vie, période au bout de laquelle leur activité est divisée par deux, peut atteindre plusieurs dizaines de milliers d'années. La production de ces déchets est due à la présence abondante d'uranium 238 dans le cœur des réacteurs.

Depuis une dizaine d'années, des études portent sur l'élimination de ces noyaux par transmutation, c'est-à-dire en provoquant leur fission dans des réacteurs spécialement conçus à cette fin. Ces noyaux dangereux seraient alors transformés en noyaux de durée de vie beaucoup plus courte, dont la nocivité s'éteindrait rapidement. Pour des raisons de sûreté, liées aux propriétés neutroniques des éléments à transmuter, les réacteurs incinérateurs devront être sous-critiques : pour maintenir la réaction en chaîne, ils devront être alimentés en continu par une source externe de neutrons créés par un phénomène appelé spallation, à l'aide du faisceau intense d'un accélérateur. C'est le concept du réacteur hybride.

... dans des réacteurs hybrides

Un tel système sous-critique fera appel à de nombreuses innovations, du point de vue physique et technologique. La recherche et le développement d'éléments d'accélérateurs de protons de haute intensité sont menés au CNRS avec pour objectif un faisceau dont la puissance atteindrait le Mégawatt. Des travaux de physique nucléaire fondamentale, sur les paramètres spécifiques aux réactions de spallation, ou encore de physico-chimie sur les matériaux d'une cible dont l'intégrité physique doit se conserver des années sont également en cours. De nombreuses expériences ont mesuré les taux de réactions jusqu'alors mal connus et qui auront lieu dans ce type de réacteur, les dégâts engendrés par les éléments produits dans les matériaux de la cible de spallation, les capacités d'incinération et le comportement neutronique très particulier d'un réacteur sous-critique (pilotage et sûreté). Enfin, il faut trouver le matériau des matrices de transmutation, qui contiennent les éléments à incinérer et qui sont placées dans un flux intense de neutrons. Ces études sont soutenues par le programme européen Euratom. À l'heure actuelle, la construction à l'échelle européenne d'un réacteur hybride expérimental est discutée. Opérationnel vers 2015, il devra démontrer la faisabilité technique de l'incinération des déchets.

Énergie nucléaire du futur

Le CNRS applique ses compétences en recherche fondamentale et ses méthodes d'expertise scientifique à l'évaluation des filières de production d'énergie nucléaire, les moins polluantes devant répondre aux enjeux du développement durable au cours du 21^e siècle.

Production d'énergie nucléaire et développement durable

Si aujourd'hui près de 75 % de l'énergie produite dans le monde provient des combustibles fossiles, l'énergie nucléaire sera appelée à jouer à l'avenir un rôle de plus en plus important, non seulement pour produire de l'électricité sans émission de gaz à effet de serre, mais aussi d'autres formes d'énergie (chaleur, hydrogène, dessalement d'eau de mer...). Quoique nécessaire, l'extension de la filière des réacteurs actuels, dédiés au cycle de l'uranium, ne peut être qu'une solution transitoire, en raison de l'utilisation peu efficace de la ressource et de la non-fermeture du cycle du combustible. Pour que la filière énergie nucléaire atteigne les objectifs qui lui sont fixés, les chercheurs doivent optimiser l'utilisation des ressources, proposer une gestion fiable des déchets, et enfin améliorer la sûreté des réacteurs.

Le CNRS, en étroite collaboration avec le CEA, s'est engagé dans l'étude de réacteurs profondément innovants, dédiés soit à l'incinération de déchets produits par la filière actuelle basée sur l'uranium, soit à la production durable d'énergie en utilisant le cycle du thorium, générateur de moins d'éléments transuraniens, économisant une incinération en réacteur hybride et brûlant une quantité moindre de matière fissile.

Le nucléaire du futur

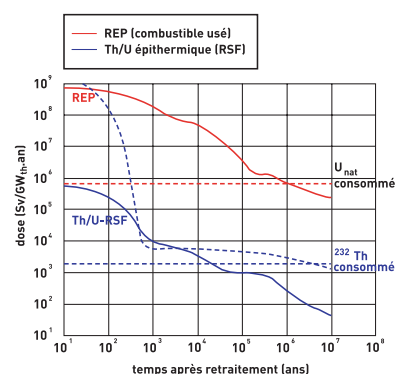
Ces options nouvelles pour le nucléaire du futur, basées sur l'utilisation optimale des éléments uranium (réacteurs à spectre rapide, refroidis au gaz) et thorium (réacteurs à spectre épithermique, à sels fondus), devraient permettre, à elles deux, de fournir 20 % de la production mondiale vers 2050. Minimisant la production de déchets, elles promettent une gestion optimisée des déchets du parc actuel, le combustible utilisé de celui-ci fournissant une partie du nouveau combustible.

Un système optimisé pour l'utilisation du thorium serait un réacteur à sels fondus, dans lequel circule le combustible liquide, qui est aussi le caloporteur. Ce système présente de tels avantages théoriques qu'il est étudié et documenté aussi précisément que possible. Le CNRS s'engage sur des expériences destinées à en valider notamment le point clé : le retraitement partiel, mais continu, du combustible. Celles-ci sont menées dans le cadre de collaborations nationales (EDF, CEA) et internationales (programmes cadres de l'Union européenne).

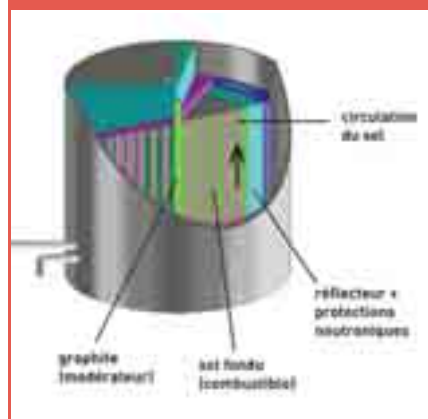
Prospective

La prospective actuelle s'oriente vers des études de validation des deux concepts de réacteurs nucléaires ci-dessus, qui apparaissent très complémentaires. L'effort du CNRS porte plus particulièrement sur les réacteurs au thorium, très flexibles et minimisant les rejets. D'autres travaux s'intéressent à la transition, incontournable, du nucléaire actuel au nucléaire du futur : conditions de déploiement, évolution des inventaires et gestion des combustibles usés.

Radiotoxicité des actinides rejetés par différents cycles à l'équilibre



La comparaison des deux courbes montre qu'à toutes les échelles de temps, le cycle Th/U (bleu) produit beaucoup moins de radiotoxiques que le cycle actuel U/Pu (rouge). La courbe pointillée montre que le danger associé aux produits de fission prend fin après environ 500 ans.



Dans un réacteur à sels fondus de la filière Th/U, le combustible liquide circule dans un bloc de graphite ; il y subit le phénomène de fission, et peut ensuite être traité à l'extérieur.

Fusion thermonucléaire contrôlée

Le contrôle de la fusion thermonucléaire est un objectif extrêmement prometteur puisqu'il s'agit de reproduire sur terre un phénomène à l'œuvre dans les étoiles : la fusion d'éléments légers accompagnée d'un fort dégagement d'énergie, sans émission de gaz à effet de serre ni production de déchets radioactifs à durée de vie longue. Le deutérium et le lithium, « combustibles » pour la fusion, sont abondants dans l'eau de mer, ce qui assurerait la disponibilité des ressources et les indépendances énergétiques nationales. La France s'est engagée dans la construction de grosses machines (tokamak ITER, laser mégajoule) correspondant aux deux filières, magnétique et inertielle, de la fusion thermonucléaire contrôlée.



© CNRS/École polytechnique. Photo A. Truc.

Dans cette chambre d'expérimentation du Laboratoire de physique et technologies des plasmas (LPTP) est créé un plasma de configuration torique permettant d'étudier la turbulence plasma dans des conditions semblables à celles rencontrées dans les grands tokamaks, et de développer les diagnostics correspondants.



© CNRS Photothèque. Photo D. Walton.

Dans cette chambre d'expérimentation du LULI, six faisceaux laser de grande puissance peuvent être focalisés sur une cible de quelques centaines de microns, de façon à étudier l'interaction laser - plasma, les équations d'état et la physique atomique des plasmas denses et chauds.

La filière par confinement magnétique

Dans cette filière, le mélange de deutérium-tritium, à l'état de plasma chaud, est confiné par des champs magnétiques, dans des machines appelées tokamaks. La France est candidate pour être le pays hôte du projet international ITER, un tokamak de très grande taille dont l'un des objectifs sera la maîtrise, sur des temps longs (500 secondes), de plasmas produisant une énergie de fusion une dizaine de fois supérieure à l'énergie injectée. Le CNRS, dont l'excellence dans le domaine de la physique des plasmas chauds est reconnue sur le plan international, se positionne dans le cadre de la physique amont de ce grand projet. Des laboratoires du CNRS, en collaboration avec le CEA, travaillent sur la stabilité du plasma, ses propriétés, son chauffage ainsi que sur le développement des diagnostics correspondants. Les travaux concernent la compréhension et le contrôle de l'interaction plasma-paroi, de la turbulence et de son impact sur le transport thermique, de la génération du courant en régime continu, ainsi que de la dynamique des populations supra-thermiques en régime thermonucléaire. Le projet ITER devrait aussi permettre aux chercheurs d'aborder d'autres problèmes relevant des préoccupations d'un futur réacteur expérimental et impliquer des disciplines comme la physique des matériaux, la physique nucléaire...

La filière par confinement inertielle

Dans la filière dite inertielle, des faisceaux laser ou des faisceaux de particules compriment un mélange de deutérium-tritium contenu dans une capsule, produisant ainsi un plasma dense et chaud. La combustion thermonucléaire de ce plasma s'effectue en des temps inférieurs au milliardième de seconde. Le CNRS soutient des recherches en amont de cette filière depuis une vingtaine d'années, tant sur le plan de la théorie, de la modélisation numérique que de l'expérience. L'organisme dispose d'une installation laser de grande puissance, le Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI), qui est aussi un grand instrument européen. Les travaux expérimentaux qui se déroulent sur les installations du LULI concernent l'interaction laser-plasma à haute intensité, non linéaire ou relativiste, en vue de l'analyse du chauffage laser, du transport thermique, de l'hydrodynamique, des équations d'états de la matière dense et chaude, de la physique atomique des plasmas chauds et des états fortement ionisés dans des conditions proches de celles rencontrées dans les plasmas stellaires.

Combustion et capture du CO₂

La combustion demeure le moyen le plus utilisé pour convertir de l'énergie à l'usage des transports, de l'industrie et du tertiaire, mais elle contribue à une part importante de la dégradation de l'environnement à l'échelle planétaire, en rejetant dans l'atmosphère des gaz à effet de serre et de grandes quantités de polluants (oxydes d'azote et de soufre, dioxines, particules...). L'optimisation des rendements énergétiques, la réduction des émissions – voire la capture – des polluants chimiques, pour protéger l'environnement et la santé humaine, restent les priorités à atteindre, avec le souci permanent de la sécurité des installations.

Optimisation de la combustion

Les études fondamentales dans les domaines de la mécanique des fluides, des transferts de chaleur et de la chimie sont essentielles pour améliorer la connaissance des phénomènes physiques liés à la combustion. Les laboratoires du CNRS, tenant compte des préoccupations des industriels, explorent la capacité des systèmes à accepter de nouveaux carburants issus de la biomasse, de résidus de raffineries, du charbon, de déchets industriels ou domestiques. Pour cela, la gazéification ou la pyrolyse de ces combustibles semblent les voies les plus appropriées pour obtenir une combustion propre des gaz de synthèse formés (CO et H₂). L'optimisation de tels procédés conduit souvent à des régimes de flammes instables susceptibles de dégrader le fonctionnement des dispositifs et de mener à leur détérioration. Les données acquises par le CNRS en partenariat avec les industriels sont utilisées pour mettre au point des procédés de combustion innovants, propres, efficaces et fiables dans les moteurs, foyers industriels et domestiques, incinérateurs et turbines à gaz. Ces systèmes sont conçus dans l'objectif de leur couplage à une unité de séparation, de capture et de séquestration du carbone (ou du CO₂) en amont ou en aval de la chambre de combustion.

Capture du CO₂

Actuellement, quatre voies principales de capture sont envisageables : la cryogénie, l'absorption gaz-liquide, l'adsorption sur charbons actifs ou sur zéolithes, la séparation membranaire. Le CNRS a engagé plusieurs actions de recherche sur l'adsorption et sur les membranes, en associant des chercheurs de plusieurs disciplines scientifiques sur trois axes : l'élaboration de nouveaux matériaux, la conception de membranes sélectives et de modules de haute compacité, enfin la mise au point de procédés hybrides combinant filtration et transformation catalytique. Ces procédés sont destinées à la récupération *in situ* du CO₂ produit lors de la combustion industrielle, avant stockage. Pour cela, des études expérimentales et des modélisations en laboratoires et sur des plates-formes technologiques permettront de mieux appréhender l'ensemble des phénomènes physiques impliqués, de prévoir le dispositif industriel à mettre en œuvre et de faire un bilan technico-économique.



Flamme de brûleur stabilisée par effet de swirl.

© CNRS LCP Poliers.



Étude d'un régime de combustion du gaz naturel avec forte re-circulation des gaz brûlés.

© CNRS PCZA Lille.

Contexte et problématique

Un vecteur énergétique doit être adapté aux fonctions attendues, aisément stockable et transportable avec le minimum de pertes aux sens de la quantité et de la qualité énergétiques, enfin réellement approprié pour l'utilisation finale recherchée, l'ensemble dans des conditions de sécurité acceptables. Le CNRS travaille sur les trois vecteurs de l'avenir.

Le vecteur le plus utilisé est l'électricité, grâce à sa facilité d'utilisation. Sa gestion devient d'une importance capitale dans le cadre de la libéralisation du marché de l'énergie (2006) : de nouvelles technologies de production, de nouvelles architectures de réseau conduisent à des problèmes de raccordement à grande échelle, de congestion, de maîtrise de la viabilité économique des développements envisagés, enfin d'acceptabilité, que le CNRS s'attache à résoudre, un effort particulier étant consacré à la fonction stockage.

Le vecteur hydrogène est un vecteur très prometteur, car il conduit à des conversions finales sans production de gaz à effet de serre. Des gains importants en productivité peuvent être obtenus par des voies catalytiques, l'exploitation de cycles thermochimiques, l'électrolyse à haute température ou à partir des énergies renouvelables, enfin par photocatalyse ou photobiologie. L'introduction de ce vecteur, converti en électricité dans les piles à combustible, nécessite des systèmes de stockage dynamique à haute capacité massique et volumique : les filières hydrures métalliques et nanomatériaux carbonés sont à développer de manière soutenue.

Au niveau du vecteur chaleur, les verrous principaux sont issus de sa perte de qualité au cours des conversions ou transformations. Le niveau de température de la chaleur est l'objet de toutes les attentions dans les échangeurs et au cours du transport sous forme de chaleur sensible ou latente, enfin durant les phases de stockage/déstockage.

Le CNRS s'est fixé comme objectif la maîtrise de ces trois vecteurs, qui nécessite une recherche pluridisciplinaire intense pour lever les verrous correspondants.

Électricité

La production de l'électricité est aujourd'hui concentrée autour d'unités de très grande puissance. La libéralisation du marché de l'énergie et la production d'électricité par les énergies renouvelables vont changer cette donne et concourir au développement massif de la production décentralisée de petite puissance. Ce type de production contribuera au renforcement de la sécurité d'alimentation en énergie et représente pour les pays émergents une chance d'accéder plus rapidement et à moindre coût à l'électricité.

Production d'énergie décentralisée : transport et distribution

L'insertion d'unités de petite ou moyenne puissance en divers points du réseau, qui caractérise la « distribution active », va modifier de manière substantielle les transits d'énergie sur le réseau, obligeant entre autres à remettre en cause les dispositifs de protection et de pilotage adaptés à un flux d'énergie unidirectionnel. Le CNRS se préoccupe de promouvoir sur ces réseaux du futur une gestion sécurisée des flux d'énergie, sans laquelle le système électrique ne pourra fonctionner dans de bonnes conditions. Cette gestion nécessite des recherches interdisciplinaires qui intègrent les interconnexions, la fiabilité de la distribution, la commande répartie des unités décentralisées et la mise au point de nouvelles architectures dont la viabilité économique et l'acceptabilité ne sont pas encore assurées.

Raccordement au réseau des énergies intermittentes

La diversification des sources d'électricité, qui incluent fortement les énergies renouvelables intermittentes (éolienne, photovoltaïque) et les systèmes de production distribués en de nombreux sites, pose des problèmes de raccordement au réseau. L'électronique de puissance doit être capable dans un tel contexte de supporter des tensions élevées (20 kV), ce qui implique des recherches sur les composants et sur l'architecture des convertisseurs. Un autre champ de recherche original concerne la commutation des forts courants en limitant les pertes et la chute de tension à la sortie des piles à combustible et des dispositifs photovoltaïques. Enfin l'emploi des matériaux supra-conducteurs à haute température dans des câbles ou des protections est également à l'étude pour des applications particulières.

Stockage de l'électricité

Le stockage de l'électricité, impossible dans le contexte actuel, sera nécessaire en certains points du réseau pour réduire les intermittences. Il devra faire appel à des batteries tampon de grande puissance et, par exemple, à des super-condensateurs. Un autre aspect du stockage de l'énergie électrique, de plus faible puissance, destiné à de petites productions, est étudié. Il s'agit des voies électrochimique, mécanique ou encore électromagnétique qui visent à maintenir la fourniture d'énergie quelles que soient les conditions de fonctionnement des unités de production (absence de vent ou de soleil, décrochage d'un fournisseur). Dans le cas particulier du transport terrestre, des batteries de forte capacité sont à l'étude comme éléments de stockage dans la motorisation électrique des véhicules hybrides.



Éolienne.

© EOLIE-RES.



Lignes électriques dans la région de Dijon.

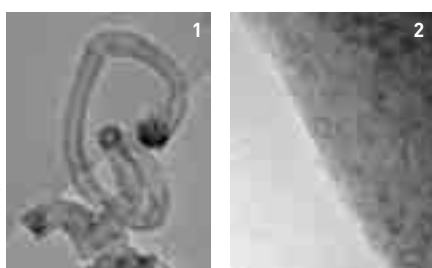
© EDF.

Hydrogène

L'hydrogène apparaît comme un bon candidat -vecteur pour répondre aux problèmes de l'approvisionnement futur en énergie car il est adapté à la plupart des sources d'énergie primaire pour sa production (hydrocarbures fossiles à court terme et renouvelables à moyen terme). En aval, il se présente comme une source d'énergie chimique idéale pour les piles à combustible, les moteurs thermiques et dans le domaine de la dépollution.



Aperçu d'un procédé catalytique de production d'hydrogène sur réacteur structuré, de l'échelle nanoscopique (croisillon de monolithe en nid d'abeille revêtu de sa couche catalytique - figure 1), au réacteur de laboratoire (équivalent à une puissance de 1 kW - figure 3), en passant par la structure générale du monolithe (figure 2).



1/ La décomposition catalytique de l'éthylène dissocié à 600 °C sur un catalyseur fer-cuivre conduit préférentiellement à des nanofibres de carbone (2 µm de longueur, 70 nm de diamètre extérieur).

2/ Zoom de la photo précédente. Observation des plans de carbone dans une nanofibre.

Production d'hydrogène par voies chimique et catalytique

La production d'hydrogène à bas coût existe actuellement pour de gros tonnages sur sites industriels. En revanche, l'investissement est prohibitif lorsque la quantité d'hydrogène à produire est peu importante (< 500 m³/h), comme c'est le cas pour les piles à combustible et les applications sur site (gamme 0-300 m³/h). Par ailleurs, les techniques de production actuelles mettent en œuvre des sources d'énergie fossiles, et relarguent donc du gaz carbonique nuisible à l'environnement.

Sur les court et moyen termes (5 à 15 ans), le CNRS cherche d'une part à préparer les voies de production futures pour un développement durable (bioproduction d'hydrogène, gazéification de la biomasse, cycles thermo-chimiques, électrolyse avancée s'appuyant sur l'utilisation des énergies renouvelables), d'autre part à améliorer et innover sur les technologies existantes (reformage d'hydrocarbures et gazéification du charbon). En effet, la demande est forte en réformeurs de petit débit, compacts, à cinétique performante, à bas coûts et compatibles avec plusieurs combustibles, pour les applications décentralisées et embarquées.

À long terme (15 à 30 ans), le CNRS entend développer les nouvelles solutions et technologies de production d'hydrogène en grandes quantités, centralisées ou délocalisées et surtout peu polluantes. Les temps de cycle dans ce domaine sont très longs et, comme le font déjà les États-Unis ou le Japon, il est indispensable de s'engager dès maintenant en recherche et développement (R&D) sur ces nouvelles voies afin d'arriver à maturité d'ici une vingtaine d'années.

Stockage de l'hydrogène

Le CNRS mène des recherches sur diverses méthodes de stockage dans l'espoir d'aboutir à la réalisation de prototypes réalistes et à leur développement industriel. Les voies « H₂ liquéfié » et « sous haute pression » (>70 MPa) sont opérationnelles, mais des problèmes liés au coût, à l'endommagement des matériaux et des structures, et à leur sécurité subsistent. Pour l'automobile, aucune solution n'est encore satisfaisante, et le CNRS travaille sur deux voies potentielles impliquant des matériaux à haute capacité de stockage : adsorption/réaction à basse pression (0,2 MPa) dans des alliages intermétalliques et adsorption sur nanostructures de carbone à moyenne pression (10-20 MPa). Les verrous sont l'obtention de ces matériaux et des systèmes associés de stockage satisfaisant aux critères de capacités volumique et massique, de tenue mécanique des matériaux et de coûts économique et énergétique. Le succès passe par la conception, la synthèse et la caractérisation de nouveaux matériaux, par une meilleure compréhension des phénomènes d'interaction hydrogène/matériaux, par la maîtrise de la production et de la mise en œuvre des matériaux dans les réservoirs, et par la maîtrise de la dynamique du stockage/déstockage dans ces réservoirs. Des approches théorique et expérimentale à des niveaux microscopique (moléculaire) et macroscopique (réservoir) sont menées de concert.

Chaleur

La forme « chaleur » des besoins énergétiques en France représente plus de 80 % des usages des combustibles fossiles. Aussi la gestion de l'énergie thermique, avec ses fonctions stockage et transport, incluant la minimisation des pertes thermiques et de sa qualité (le niveau de température), représente un très fort enjeu du point de vue des ressources et pour la préservation de l'environnement.

Optimisation des échangeurs de chaleur

La compacité des échangeurs impose des études approfondies de la physique du changement de phase de nouveaux fluides, en présence de convection, à haute température et en milieu confiné. Elle nécessite également de prendre en compte le comportement des écoulements diphasiques, qui provoque les problèmes de distribution et d'encrassement. Le CNRS conçoit des échangeurs multifonctionnels et développe des micro-composants thermiques afin de résoudre les problèmes thermiques des nouvelles technologies de l'énergie en fonctionnement dynamique, en particulier les piles à combustible et la gestion du stockage de l'hydrogène associée.

Solaire thermique et besoins dans l'habitat résidentiel et le tertiaire

La captation thermique à basse température, associée au photovoltaïque, pourrait couvrir à faible coût les besoins thermiques dans l'habitat et le tertiaire. Dans le futur, elle intégrera des unités de stockage avec des échangeurs à faible débit ou des caloducs d'une part, des systèmes dédiés à la gestion de la chaleur d'autre part. Le CNRS travaille sur les procédés à sorption liquide ou solide capables d'amplifier la quantité de chaleur introduite, de remonter son potentiel thermique ou de produire du froid, tout en incluant la fonction stockage et des variations de puissance importantes. Les procédés seront intégrés dans la domotique avancée, qui assurera l'adéquation entre besoins et ressources réels.

Gestion locale des ressources et besoins en énergie thermique

Le développement de la co-génération chaleur/travail et l'existence de sources d'énergie thermique mal, voire non utilisées, comme les centrales d'incinération, imposent de réfléchir à de nouveaux moyens de transport de la chaleur. En effet, les réseaux de chaleur urbains, transportant de l'eau chaude ou de la vapeur sous forme de chaleur sensible, ne peuvent s'étendre en longueur, sous peine de pertes thermiques importantes. Les réseaux de distribution de froid, sous forme de chaleur latente, doivent encore être perfectionnés pour atteindre une économie acceptable sur site commercial ou résidentiel. Un concept de procédé de transport sur de longues distances, propriété du CNRS, permet de vraies interconnexions entre ressources et besoins : la circulation d'un gaz en circuit fermé assure, par des réactions endo- et exothermiques vis-à-vis de solides bien choisis, le transport de chaleur ou de froid. La fonction stockage est intégrée dans ces nouveaux procédés. L'installation de tels procédés satisfierait l'adéquation ressources et demandes, locales et régionales, avec l'économie correspondante.



Testé sur ce banc de cyclage, le système thermochimique solide - gaz mis au point au CNRS permet une production de froid à partir de chaleur et non plus à partir d'électricité. Ce procédé possède de nombreux avantages : parfaite autonomie, encombrement réduit et absence totale de son ou de vibration.

© CNRS-IMP

Contexte et problématique

L'analyse de l'évolution de la consommation finale d'énergie par secteur montre qu'en Europe, le résidentiel-tertiaire en représente environ 40 %, le transport environ 32 % et l'industrie 28 %. Une forte augmentation de cette consommation est prévue d'ici 2020, en particulier pour les deux premiers secteurs. L'énergie consommée provient exclusivement du pétrole pour le transport, et pour une grande part du pétrole et du gaz naturel dans l'habitat. L'analyse détaillée des facteurs de progression des émissions de CO₂ souligne l'importance de solutions innovantes à développer, dans des conditions de coût acceptables, essentiellement dans ces deux domaines.

Les recherches conduites par le CNRS sur ces domaines stratégiques reprennent en partie les conclusions de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques de 2001 sur deux plans mobilisateurs pour l'habitat (*Face Sud pour des bio-toits intelligents*) et pour les transports (*Terres-énergie pour des biocarburants indépendants*).

Le premier plan a pour objectif le renforcement de la performance énergétique des bâtiments et la recherche de nouvelles sources, voire leur hybridation (solaire thermique, photovoltaïque, matériaux fonctionnels, géothermie de surface) aussi bien pour le bâti neuf que pour la réhabilitation de l'existant. Ceci devra conduire au concept d'habitat à faible consommation d'énergie.

Le second plan vise l'accroissement de la production de biocarburants tout en accélérant les progrès scientifiques et technologiques sur la combustion de ces carburants dans le but de diminuer la consommation et les émissions de gaz à effet de serre. Cette recherche est conduite en partenariat avec les industries pétrolières et les constructeurs automobiles. Enfin, dans le domaine des transports, mais aussi de l'habitat, un important travail est orienté vers les nouveaux générateurs d'électricité et de chaleur que sont les piles à combustible : piles à membrane pour les transports et piles à électrolyte solide pour les systèmes stationnaires à co-génération. Ces piles représentent des solutions d'avenir, par leur caractère non polluant, à condition de maîtriser l'approvisionnement en hydrogène et de baisser les coûts de manière drastique.

Habitat

Les habitudes de confort évoluent vers des conditions d'ambiance de plus en plus contraignantes. Les comportements vestimentaires sont modifiés, la population vit plus longtemps et son métabolisme se ralentit avec l'âge. La consommation énergétique consacrée à restituer des conditions d'environnement immédiat acceptables pour l'homme dans son cadre de vie quotidien, et qui constitue déjà le premier poste de consommation en France, ne peut donc que s'aggraver dans l'avenir. Les actions de recherche du CNRS intègrent le bâti neuf mais considèrent surtout la réhabilitation de l'existant, part majoritaire des travaux relatifs à l'habitat en France.

Géothermie de surface

L'intégration du sous-sol, avec sa masse thermique de niveau de température quasi-constant au fil des saisons, est une source ou un puits de chaleur aujourd'hui négligé dans le cadre de la gestion thermique des bâtiments. De nouveaux systèmes trithermes – avec les composantes : source de chaleur dynamique comme le solaire, géothermie de surface avec ses apports constants du plus profond, ou variables par les puits dits canadiens de renouvellement d'air extérieur – sont en cours de développement avec pour objectifs d'assurer une très forte indépendance énergétique et des besoins maîtrisés. De tels systèmes doivent être rapidement installés dans le résidentiel et le tertiaire actuels.

Habitat bioclimatique

Les recherches sur l'habitat bioclimatique visent à examiner les relations entre le bâti et son environnement proche pour les introduire dans les modèles de conception architecturaux et optimiser la consommation énergétique. L'intégration et l'optimisation de composants solaires passifs ou actifs dans le bâtiment, la recherche de processus originaux permettant d'améliorer les transferts d'énergie depuis ces composants vers l'intérieur, dans une démarche de haute qualité environnementale, sont également au cœur des préoccupations des équipes de recherche du CNRS. Les outils de recherche intégrant une approche socioéconomique sont privilégiés, les démarches efficaces de gestion de l'énergie intégrant toutes les interactions intérieures et extérieures à l'habitat restent à trouver.

Enveloppe et intérieur du bâtiment

L'enveloppe du bâtiment évolue vers des systèmes plus élaborés, tels les dispositifs double peau qui paraissent améliorer les performances d'isolation tout en permettant l'intégration de systèmes variés (capteurs photovoltaïques par exemple). Des composants nouveaux constitutifs des parois sont recherchés. Dans ces dispositifs et à l'intérieur des bâtiments, la ventilation naturelle ou contrôlée, la maîtrise des mouvements d'air sont aussi déterminantes. Les recherches sont développées dans les laboratoires afin de mieux comprendre les mécanismes de ces mouvements pour les modéliser et d'essayer de les contrôler de façon à s'approcher des conditions de confort optimal tout en minimisant la consommation énergétique.



Exemple unique d'utilisation du concept de double peau intégrant un dispositif photovoltaïque, la Maison du Tourisme et des Cévennes.

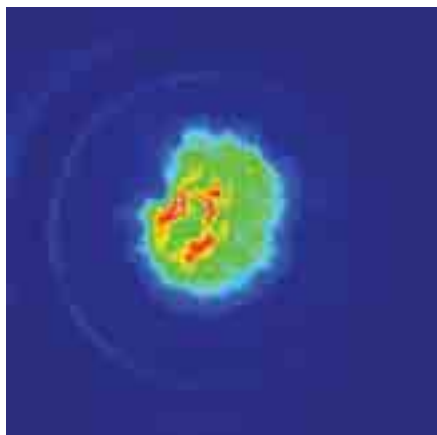


La visualisation des mouvements d'air internes aux bâtiments (au voisinage d'une bouche d'air sur la photo) contribue à la compréhension des turbulences et participe à la maîtrise du transfert de chaleur.

Des moteurs propres et économes pour l'automobile

Pour les vingt prochaines années, les moteurs à combustion interne resteront le principal mode de propulsion des automobiles. Pour cette raison, les problèmes d'environnement sont au cœur des préoccupations des motoristes, à trois niveaux : réduction des émissions polluantes issues de la combustion pour respecter les normes 2005 et lutter contre l'effet de serre, réduction des consommations, diminution de la pollution sonore.

Les enjeux scientifiques conduisent au développement de deux principales thématiques de recherche.



© Ceram.
Combustion dans un moteur en injection directe.

Nouveaux modes de combustion

Depuis plusieurs années, la combustion de mélanges pauvres à richesse stratifiée accompagnant l'injection directe est le cheval de bataille des chercheurs, pour réduire la production d'oxydes d'azote notamment. Cela conduit à des instabilités de combustion qui n'ont pas encore été complètement maîtrisées à ce jour, et nécessite une recherche au niveau des conditions d'allumage.

Le défi scientifique des prochaines années est maintenant focalisé sur la combustion dite homogène, sans propagation de flamme, où le mélange est auto-inflamé directement par compression, ce qui conduit à une forte réduction des oxydes d'azote émis. Le procédé nécessite des recherches fondamentales sur tout ce qui concerne l'aérodynamique du mélange et il est largement dépendant de la cinétique chimique du carburant utilisé. Cette cinétique reste un point clé pour la définition de nouveaux carburants et l'utilisation des biocarburants. Les recherches doivent se coordonner autour de la composition des carburants et de la préparation du mélange, de la combustion, du traitement des effluents et des interactions avec les structures. Plusieurs laboratoires du CNRS sont déjà mobilisés sur ces problèmes. Ils sont équipés de moyens de simulation et de dispositifs expérimentaux et métrologiques. Pour les essais sur moteurs réels, il existe une plate-forme opérationnelle localisée en Haute-Normandie.

Un avantage important concerne l'émission sonore accompagnant ce nouveau mode de combustion, qui est en fait un cliquetis permanent et contrôlé.

Utilisation des plasmas pour la combustion et la dépollution

Les décharges plasma impulsives générées dans les milieux gazeux à des pressions supérieures ou égales à la pression atmosphérique représentent de remarquables convertisseurs d'énergie électrique en énergie chimique sous forme de radicaux actifs. Ces systèmes sont caractérisés par des coûts énergétiques faibles puisque la voie thermique consommatrice d'énergie n'est pas activée. Deux champs d'application sont développés par le CNRS. L'allumage d'un mélange combustible par plasma froid où la création directe des radicaux est très favorable à l'initiation de flammes dans des mélanges pauvres mal contrôlés. Ces recherches doivent être menées de concert avec les études de cinétique d'allumage. D'autres études concernent la dépollution des filtres à particules à l'échappement diesel grâce à la propriété des décharges plasma qui sont naturellement oxydantes. Des expériences encourageantes sur banc moteur ont montré que ces systèmes plasmas pouvaient être une solution alternative pour résoudre les problèmes environnementaux.



© CORIA.
Stabilisation d'une flamme par plasma.

Piles à combustible

Les piles à combustible permettent de transformer directement, sans combustion thermique, l'énergie chimique de combustion dans l'oxygène d'un combustible en énergie électrique. Les avantages de cette conversion résident dans une réduction des nuisances à l'égard de l'environnement (pas d'émission de gaz nocifs, faible bruit) et dans un rendement élevé, supérieur à 40 %, allant même jusqu'à 90 % si l'on opère en co-génération.

Les piles à combustible, des alternatives prometteuses

Selon la nature de l'électrolyte et du combustible, et le niveau de température de fonctionnement, on distingue plusieurs types de piles, dont deux font l'objet de recherches importantes tant à l'échelle européenne que mondiale. C'est sur ces technologies que portent les efforts du CNRS : il s'agit des piles PEMFC (piles à membranes polymères protoniques, 80-100 °C) fonctionnant à basse température et des piles SOFC (piles à carbonates fondus, 600-700 °C) dites à haute température.

Les PEMFC pourraient avantageusement remplacer les moteurs thermiques dans les transports et les accumulateurs électriques dans les équipements électroniques portables (recharge instantanée, densité d'énergie 5 à 10 fois plus importante, autonomie 2 à 5 fois plus élevée). Un élément de pile hydrogène/oxygène délivre une tension continue de l'ordre de 1 V. Les chercheurs envisagent de disposer des combinaisons (parallèles, séries...) de ces éléments et d'y adjoindre des interfaces électroniques destinées à la régulation et, le cas échéant, à la transformation des tensions en mode alternatif. De plus, grâce à des technologies issues de la microélectronique, on a pu atteindre des densités de courant électrique de 70 à 100 mA/cm² pour des micropiles. Les SOFC permettraient quant à elles la production d'énergie stationnaire avec un minimum de pollution et un rendement électrique élevé, largement dopé par une exploitation de mode co-génération. D'ores et déjà, des unités de 5 à 10 kW sont expérimentées pour produire de l'électricité et de la chaleur (ou du froid) domestique à partir du gaz naturel.

Perspectives à long terme

Dans chacune de ces applications, de nombreux problèmes (membranes, catalyseurs, matériaux d'interconnexion...) restent à résoudre avant la commercialisation. De nouveaux composants du cœur de pile sont à développer, de nouveaux concepts de gestion de la chaleur et des fluides sont à mettre en œuvre dans les cœurs de pile. Reste enfin à maîtriser le problème de l'alimentation en combustible et en particulier celui de la disponibilité de l'hydrogène pour les PEMFC.

La fiabilité et la durée de vie, notamment dans le cas d'applications stationnaires, constituent des enjeux d'importance et les chercheurs du CNRS travaillent par ailleurs à la possibilité de fabriquer des piles recyclables à partir de matériaux disponibles, pour aller, dans ce domaine également, vers un développement durable : ceci n'est pas le cas aujourd'hui, notamment avec l'économie non maîtrisée du platine.

Les différentes études de marché prévoient en général une introduction significative de cette technologie à partir de 2010 et un marché important, de l'ordre d'une dizaine de milliards d'euros, à partir de 2020-2030. Le devenir de cette technologie est donc celui d'un véritable bien intermédiaire primordial dans le monde.

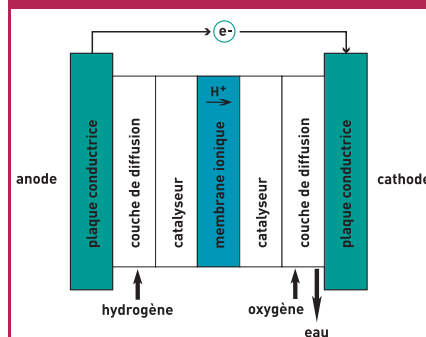


Schéma de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC.

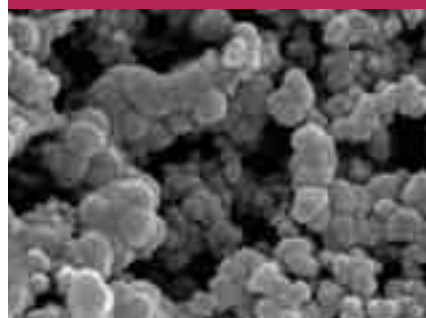


Image de microscopie électronique à balayage d'une électrode de pile à combustible PEMFC obtenue par pulvérisation plasma (CataPulP).



Réacteur d'élaboration d'électrodes de piles à combustible, CataPulP (Catalyseurs par pulvérisation plasma).

Contexte et problématique

Sous l'influence de plusieurs transformations majeures – changement climatique (lié à l'effet de serre additionnel qui fait l'objet de négociations internationales pour la préservation d'un « bien public mondial »), re-concentration des approvisionnements énergétiques sur une zone géopolitiquement risquée, dérégulation ou libéralisation des marchés énergétiques et en particulier de l'électricité et enfin accélération des processus de développement – l'humanité est confrontée à des modifications considérables du paysage énergétique. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) souligne dans son troisième rapport qu'à l'horizon 2050, si l'on souhaite stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre, les émissions mondiales ne devraient pas dépasser la moitié des émissions actuelles. Les programmes de recherche sur l'énergie vont devoir s'atteler de manière prioritaire à la résolution de ce problème.

Depuis la première crise énergétique de 1973, le CNRS possède une longue tradition d'implication des sciences de l'homme et de la société dans les recherches sur l'énergie. Cette impulsion forte doit être maintenue afin d'analyser, en liaison avec les sciences de l'ingénieur, les possibilités de diffusion des technologies énergétiques sous la forte contrainte de limitation des émissions. Plus particulièrement, il s'agit de suggérer des politiques publiques à même d'accélérer la conversion de nos systèmes énergétiques vers cet objectif.

Les conditions nouvelles impliquent des recherches portant sur l'évolution des sociétés vers des systèmes énergétiques soumis à ces nouvelles contraintes, dans tous les champs des sciences humaines et sociales : faisabilité technique et économique de régimes mondiaux à faible niveau d'émissions ; mesures nationales de politiques publiques (permettant de satisfaire aux objectifs européens et à ceux du Protocole de Kyoto) ; évolution de la demande d'énergie à long terme et compréhension des liens entre systèmes énergétiques et développement économique ; questions d'habitat et de transports ; incitations et freins à l'innovation dans le domaine énergétique ; question de l'acceptabilité par les citoyens de l'enfouissement des déchets nucléaires, des économies d'énergie ou des énergies renouvelables.

Évaluation et prospective

Dans les domaines de l'évaluation et de la prospective énergétiques, les chercheurs du CNRS sont confrontés à de nouveaux défis. La prospective énergétique voit son horizon temporel s'éloigner – on sait par exemple que les questions liées à l'effet de serre doivent être envisagées sur le très long terme – et se complexifier en raison de la mise en place très mesurée des politiques publiques au niveau national et au niveau international (Convention climat).

Évaluation et comparaison des filières technologiques

La problématique des chercheurs est de tester comment peut s'opérer la réorganisation des systèmes énergétiques dans le contexte de la mutation des économies et des sociétés, alors que celles-ci sont de plus en plus confrontées aux exigences du développement durable, en termes de contraintes climatiques, de sécurité des installations et de fourniture des énergies de base aux populations. Ces contraintes ne peuvent être surmontées que par des changements, lents par nature, des styles de consommation et par de profondes réorganisations dans et entre les divers segments des systèmes énergétiques.

Pour les socio-économistes, l'un des axes de recherche prioritaire est de comparer les trajectoires prospectives d'évolution des consommations qui sont déterminées par celles de la structure de l'activité économique, des processus industriels, des choix technologiques et des politiques de réduction de la demande finale d'énergie, et d'en déduire l'évolution de la structure de production d'énergies primaires selon le choix entre énergie fossile (avec ou sans séquestration du CO₂), renouvelable ou nucléaire. Dans le même ordre d'idée, les chercheurs du CNRS analysent les conditions de développement des nouveaux procédés de transformation énergétique, de la valorisation multi-énergies (la co-génération) et du rapprochement de ces procédés des usages de l'énergie, notamment par la production décentralisée.

Prospective dans le domaine de l'énergie

La prospective énergétique suppose le développement de modèles de simulation à vocation complémentaire. D'abord des modèles sectoriels, aptes à rendre compte de la structure technologique des systèmes énergétiques et de leur cohérence en dynamique. Ensuite, des modèles qui assurent l'homogénéité des scénarios énergétiques. Dans ce dessein, les chercheurs du CNRS intègrent dans les modèles des paramètres tels que l'équilibre des échanges de biens et services, la compétitivité industrielle ou les contraintes de financement, mais aussi les structures incitatives (fiscalité, tarification, subventions, R&D, normes) qui permettent de comprendre le déploiement des technologies et les évolutions des comportements de consommation. Les recherches sont structurées par des analyses de faisabilité. Dans un premier temps, les chercheurs font évoluer la situation actuelle vers une société à bas profil d'émissions de gaz à effet de serre. Ensuite, ils étudient les cheminements pour y parvenir. La démarche prospective consiste donc à définir un futur souhaitable à horizon éloigné et à développer des modèles pour y parvenir.

Gouvernance participative et problème d'acceptabilité

La réorganisation des systèmes énergétiques et la mutation des économies et des sociétés sont confrontées aux exigences du développement durable. Aujourd'hui, répondre à ces défis suppose d'entreprendre, outre des recherches à caractère purement technologique, des recherches sous l'angle de l'analyse socio-économique voire sociologique. Ainsi, l'étiquetage énergétique (comment les citoyens perçoivent les économies d'énergie) et le recours aux énergies renouvelables ou au contraire la contrainte née des risques collectifs (enfouissement des déchets) soulèvent un problème d'acceptabilité de la part des citoyens.



Barrage microhydraulique.

Acceptabilité citoyenne des énergies renouvelables

Un axe de recherche en sciences humaines et sociales consiste à identifier les obstacles qui empêchent l'introduction de nouvelles énergies dites renouvelables. Déjà, des sociologues réalisent des études qualitatives, préalable indispensable à une meilleure compréhension du déficit d'image de ces énergies. Ainsi le contexte économique joue-t-il considérablement dans la hiérarchie des préoccupations collectives, énergie dominante (peu chère) contre énergies d'appoint (jugées plus coûteuses). Des sociologues ont déterminé que, même si elles paraissent non polluantes, un certain nombre de qualificatifs discréditent les énergies renouvelables aux yeux de leurs utilisateurs potentiels. Absence d'enquête sur leur représentativité, confusion volontaire ou involontaire dans le choix du vocabulaire, manque de notoriété ou contraintes structurelles et institutionnelles à leur diffusion sont autant de freins pesant sur les choix citoyens. Pour y remédier les chercheurs du CNRS mènent des études qui les réintègrent dans le débat.

Analyse sociologique de la gestion des déchets

Le cas de la gestion des déchets nucléaires constitue un terrain privilégié d'analyse pour les chercheurs du CNRS. Il faut notamment retracer la trajectoire du problème, sa formulation, ses différentes inscriptions sur l'agenda des pouvoirs publics, et, enfin, le processus de « mise en politique » de la question à la suite de controverses suscitées par le choix d'une solution technique (l'enfouissement) présentée comme une « nécessité incontournable », ce qui s'est traduit par l'intervention d'acteurs auparavant tenus à l'écart : les parlementaires et les élus locaux. Un débat public sur ce sujet et le vote d'une loi originale, en 1991, ont conduit à une revitalisation de la recherche. Cette mobilisation plus large de la communauté scientifique a abouti à l'ouverture de choix possibles et de scénarios envisageables pour traiter ou stocker les déchets.

Ce cas permet de mettre en lumière le rôle joué aujourd'hui par les controverses citoyennes dans la mise en forme des problèmes publics et leur traitement politique. Ainsi, certaines instances sont de plus en plus incontournables dans l'élaboration des politiques menées. C'est le cas par exemple de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST). Cet organisme se trouve désormais régulièrement saisi de questions (le nucléaire par exemple) auparavant traitées en vase clos et sur un mode essentiellement réglementaire. Avec ce type de dispositifs, de nouvelles procédures consultatives sont mises en place : elles ont pour objectif de rendre acceptables certains projets technologiques en recomposant les réseaux d'acteurs concernés et en favorisant la réversibilité des décisions.



Tube d'échantillon en T 91 de Lisor. Cet appareil, conçu pour l'étude de différents matériaux de structure sous irradiation en contact avec des métaux liquides et sous contrainte mécanique, est construit dans le cadre du groupement de recherche Gédéon (Gestion des déchets par des options nouvelles du programme PACE).

Politiques publiques et négociations

Dans ce champ de recherche s'entremêlent des questions économiques, des questions technologiques et la recherche de l'équité entre les pays. Les chercheurs peuvent aider la collectivité à déterminer comment devront se répartir les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre (et donc de leurs coûts) entre les pays et entre les générations présentes et futures.

Négociations internationales

Dès lors que des objectifs quantifiés d'émissions sont fixés au niveau international, la question des politiques et mesures devant être mises en œuvre se pose. Parmi les recherches menées ces dernières années, certaines concernent le choix de modes de coordination : prix versus quantité, permis versus taxe. Ainsi, lors des discussions qui ont conduit au Protocole de Kyoto, les pays ont choisi de privilégier une approche par quotas, associée à l'émission de permis négociables, de préférence à une approche par les taxes et ce, pour des raisons tant politiques que diplomatiques. Un travail de recherche très important reste à réaliser pour définir les normes à long terme qui permettront le fonctionnement sans distorsion d'un tel mode de coordination (règles d'attribution des quotas dans le cas de l'entrée de nouveaux pays, règles pratiques sur l'échange de permis...). Les chercheurs du CNRS s'intéressent également à des recherches sur l'association au Protocole de pays non signataires (ré-association des États-Unis ou entrée de pays en développement). Ainsi, en préalable de leur participation au Protocole, divers mécanismes ont été proposés pour impliquer les pays en développement dans la réduction des émissions. Ces problématiques soulèvent celle de l'avenir du Protocole, objet de recherche à part entière.

Innovations énergétiques et politiques publiques

Les recherches du CNRS visent à déterminer les barrières économiques et sociologiques nées de l'introduction des nouvelles techniques et des dynamiques d'innovation. C'est un objectif important pour définir les instruments d'incitation utilisables par les pouvoirs publics afin de stimuler le changement technique.

L'analyse des mécanismes de diffusion technologique vise à améliorer la compréhension des verrous économiques et sociaux. Il s'agit d'analyses sectorielles fines réalisées dans des domaines technologiques précis – énergies renouvelables, techniques de transformation énergétique, techniques d'exploitation de la biomasse – qui s'élargiront aux techniques de séquestration du carbone.

Les chercheurs étudient également les outils de stimulation des innovations énergétiques tels que les accords volontaires, les subventions à l'adoption, l'ouverture de marché par des commandes publiques, les tarifs d'achat administrés ou encore la certification verte et la tarification verte, afin d'en mesurer l'efficacité, que ce soit en régime de monopole ou en régime concurrentiel.

L'évaluation de l'efficacité des stratégies de recherche et développement en vue du développement durable s'appuie sur l'analyse comparée de l'efficacité des systèmes nationaux d'innovation qui concerne tant les actions publiques que les stratégies d'innovation des firmes en fonction des anticipations de mesures environnementales et du prix de l'énergie.

L'analyse des déterminants de la demande énergétique implique la prise en compte de quatre critères : l'indépendance énergétique, l'impact environnemental des émissions de carbone dans le contexte du changement climatique, l'accroissement de la demande non seulement des pays en développement, aspirant à une plus forte industrialisation, mais aussi des pays de l'Organisation de coopération et de développements économiques (OCDE), enfin la diminution prévisible des ressources fossiles dans la deuxième moitié du 21^e siècle. La réponse aux trois premiers critères est d'autant plus difficile que l'on prévoit un doublement de la demande énergétique en 2050, ce qui implique de diviser par quatre les émissions de CO₂ actuelles pour stabiliser les concentrations dans l'atmosphère. Elle ne peut être réalisée qu'à partir de quatre conditions : économiser l'énergie, développer les énergies non émettrices de CO₂ (énergies renouvelables ou nucléaire), capturer et stocker le CO₂ lors de l'utilisation des énergies fossiles, accroître l'efficacité énergétique.

Dans chacun de ces domaines, la recherche a un rôle clé à jouer pour proposer de nouvelles solutions et identifier les ruptures scientifiques et les verrous technologiques. Elle doit se placer dans une nécessaire continuité en établissant des échéanciers probables de réalisation. Elle doit enfin procéder d'une approche globale fondée sur un « mix » énergétique et conduire à un ensemble de technologies nouvelles répondant aux critères d'efficacité économique, d'acceptabilité sociale et de protection de l'environnement.

À court terme si l'on se fonde sur la demande, un effort important doit être porté sur le vecteur électricité, l'habitat et le transport.

L'énergie dépensée dans le résidentiel-tertiaire peut être diminuée de façon conséquente en utilisant l'énergie solaire, la géothermie de surface, de nouveaux matériaux, tout ceci couplé à une nouvelle architecture.

Pour le transport, des progrès peuvent être encore envisagés pour augmenter le rendement des moteurs à combustion, motorisation principale des quinze à vingt prochaines années, et pour le traitement des émissions. Un effort conséquent doit être mené sur les moteurs hybrides, le gaz devenant, quant à lui, le combustible des flottes de transport captives. La production de biocarburants est une alternative intéressante au pétrole. Les problèmes induits concernent l'acceptabilité d'une agriculture industrielle et une parfaite gestion des forêts. Pour que cet effort de recherche ne soit pas annihilé, l'allègement des véhicules est indispensable (nouveaux matériaux, calcul des structures...) ainsi qu'une refonte des modalités du transport.

Pour ce qui concerne l'électricité, le développement des énergies renouvelables entraîne une production décentralisée avec des générateurs de faible puissance et, pour certaines sources, une production intermittente. Se posent, ainsi, les problèmes du stockage, des réseaux distribués et de leur raccordement aux grands réseaux nationaux et européens.

L'énergie éolienne (déjà mature) ne peut que se développer. Toutefois, la combustion de la biomasse et des déchets apporte par co-génération électricité et chaleur. Le transport de ce vecteur à longue distance est un enjeu de recherche crucial.

Même si les centrales de grande puissance au gaz naturel sont une alternative très intéressante, on ne peut, dans un avenir à court terme, faire fi de

l'énergie nucléaire. Les recherches très actives sur le traitement des déchets et sur les réacteurs de nouvelle génération peuvent offrir des solutions acceptables par notre société. Encore faut-il que ces réacteurs soient sûrs, fiables, résistants face aux risques de prolifération nucléaire, économiques et durables. Enfin, le programme ITER sur la fusion thermonucléaire doit démarrer le plus rapidement possible pour nous permettre d'envisager une solution d'avenir à l'horizon de 2050 et plus.

À moyen terme, c'est-à-dire à partir de 2015 - 2020, deux filières (le photovoltaïque et l'hydrogène) peuvent devenir matures à condition d'intensifier notre recherche afin de provoquer des ruptures technologiques.

Le photovoltaïque, dont le coût baisse d'année en année, sera de plus en plus utilisé pour la production d'électricité décentralisée et, combiné au solaire thermique, pour l'autonomie énergétique du résidentiel - tertiaire.

La filière hydrogène a, quant à elle, un avenir incontestable si l'on en maîtrise la production (à partir de gaz naturel, puis par électrolyse, cycles thermo-chimiques ou même par micro-algues), le stockage en fonction de l'utilisation future et le transport. La maîtrise des piles à combustible et surtout l'abaissement de leur coût, quel que soit leur mode de fonctionnement, stationnaire ou embarqué, demande encore un gros effort en recherche et technologie. Cependant, la non émission de gaz à effet de serre et la potentialité d'utilisation des piles à combustible pour la production d'électricité et de chaleur (avec un rendement d'ensemble très élevé) et comme moteur de véhicule font de l'hydrogène le vecteur d'avenir.

La capture et le stockage du CO₂, parties intégrantes du programme CNRS, seront pour la plus grande part menés dans le cadre du « club CO₂ » initié par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) et dirigé par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).

Ainsi, à long terme, la réponse aux quatre critères énoncés pourrait être un bouquet énergétique composé d'énergies renouvelables (solaire et éolien), d'hydrogène, de fusion thermonucléaire (si les résultats sur ce procédé sont probants) et d'énergies fossiles. Pour y parvenir, deux conditions sont nécessaires. En premier lieu, l'implication des chercheurs en sciences humaines et sociales sur les problèmes de réglementation, d'évaluation des filières technologiques innovantes ainsi que sur les coûts internes et externes sur les voies nouvelles pour une meilleure gouvernance technologique, et sur les nouveaux modes de vie impliquant des économies d'énergie. Ces recherches sont une condition indispensable à l'acceptation par notre société des changements nécessaires. En deuxième lieu, un partenariat fort doit être établi entre la recherche publique française et les recherches européenne et internationale et surtout avec les entreprises de façon à couvrir, pour un même sujet, recherche amont et développement technologique.

La recherche doit fournir des solutions sans a priori tandis que le partenariat industriel, indispensable au développement technologique doit, pour baisser les coûts, ouvrir les marchés en répondant aux besoins des pays de l'OCDE et des pays en développement.

Pour en savoir plus :

Adresse web du programme Énergie : www.imp.cnrs.fr/energie

Adresse web du programme PACE : <http://pace.in2p3.fr>

Cette plaquette est éditée par la Délégation à l'information scientifique et technique (DIST) du CNRS.

Conception : Stéphanie Lecocq/stephanie.lecocq@cnrs-dir.fr

Coordination de ce tirage : Anne-Solweig Gremillet

Coordination et iconographie : Marie Auffray

Conception graphique : Laura Slawig

Adaptation graphique de ce tirage : Sarah Landel

Impression : Caractère

Février 2005

Remerciements à Cyrille Le Déaut.

FOCUS

www.cnrs.fr

CONCEPTION GRAPHIQUE : ATLANTE - PARIS



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
3, RUE MICHEL-ANGE 75794 PARIS CEDEX 16 • TÉL. 01 44 96 40 00 • TÉLÉCOPIE 01 44 96 53 90