

6

ÉNERGIE : RESSOURCES, CONVERSION, UTILISATION

Monique LALLEMAND

Jean-Pierre Bertoglio

Alain Bonneville

Yves Brunet

Jean Delsey

Édouard Fabre

Dominique Finon

François Forest

Édouard Freund

Alix Gicquel

Gérard Goma

Patrick Hug

André Lallemant

Claude Lamy

Christian Le Brun

Thierry Lebey

Jacques Lédé

Arnold Migus

Jean-Michel Most

Claude Mirodatos

François Penot

Dominique Perreux

Jérôme Perrin

Denis Pesme

Jean-Bernard Saulnier

Bernard Spinner

Michel Trinité

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 (GES), 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. Le développement durable implique une approche qui doit viser, d'une part, à limiter la consommation d'énergie, d'autre part, à remplacer les énergies fossiles par d'autres sources d'énergie.

Tous les responsables des Groupes d'Analyse Thématique
du Programme Interdisciplinaire Énergie du CNRS

1 – LES DÉTERMINANTS DU FUTUR

Croissance des besoins, contraintes probables sur l'exploitation des ressources épuisables et concurrence entre impacts environnementaux des différentes filières énergétiques conditionnent les réponses scientifiques, techniques et économiques. Celles-ci nécessitent de nouvelles connaissances en vue de développer l'innovation et les technologies adaptées.

1.1 UNE CROISSANCE DES BESOINS D'ÉNERGIE, FLÉCHISSABLE PAR LE PROGRÈS TECHNIQUE

Croissance démographique, répartition de la croissance mondiale, contenu des croissances nationales, habitudes de consommation et technologies sont les cinq facteurs déterminants du niveau des besoins. Certes, depuis 1973, les évolutions ont joué dans un sens plutôt favorable à la préservation des ressources car la croissance démographique se réduit plus rapidement que prévu et la population mondiale devrait se stabiliser à partir de 2030 aux alentours de 8 à 9 milliards d'individus. On a observé également un certain découplage entre croissance économique et consommation énergétique, phénomène qui est dû à la dématérialisation des économies riches (tertiarisation, allègement des procédés et des produits) et à une certaine amélioration des efficacités énergétiques.

Mais le défi énergétique du futur est loin d'être gagné. Il existe un facteur fort jouant en sens inverse, qui résulte du fait que la croissance des pays en voie de développement se traduira par une augmentation plus que proportionnelle des besoins de transport et de confort d'une population qui aspire au mode de vie des pays riches. De plus, du côté des pays riches, leur capacité et leur volonté de modifier radicalement leurs modes de consommation tout en maintenant leur niveau de richesse et leur croissance demeure une inconnue.

La demande énergétique mondiale, soit 9,8 Gtep (1 tonne équivalent pétrole ~ 12 MWh) en 2000, pourrait doubler d'ici 2050 vers un niveau de 20 Gtep si le rythme de croissance économique se maintient au rythme des 30 dernières années, sans découplage entre croissance et énergie. Pour aller vers des niveaux de 12 à 15 Gtep qu'il serait nécessaire d'atteindre pour au moins stabiliser les émissions de GES, il faudra agir radicalement sur la demande par la poursuite de la dématérialisation et la mise sur le marché d'équipements de plus en plus efficaces, et par un infléchissement marqué des modes de consommation.

1.2 LES CONTRAINTES SUR LE POTENTIEL DES RESSOURCES FOSSILES

Les ressources fossiles représentent environ 85 % de la consommation énergétique mondiale. En termes de ressources, la situation est très différente pour les trois grands types d'énergie fossile.

Pour le **pétrole**, les pessimistes prédisent un maximum de production imminent, vers 2010, suivi d'un lent déclin, avec une hausse importante du prix. Au contraire, les optimistes repoussent le pic de production du pétrole conventionnel au-delà de 2030, sans effet sur les prix. Les modérés considèrent que, compte tenu des progrès technologiques en exploration pétrolière et des taux de récupération dans les gisements existants, l'offre en pétrole conventionnel permettra de satisfaire une demande même croissante au rythme actuel jusque vers 2020. De plus, les ressources en pétroles lourds et extra-lourds, au moins équivalentes à celles en pétrole conventionnel, seront d'un apport considérable grâce aux progrès à attendre sur toute la chaîne allant de leur production à leur transformation.

Les évaluations sont plus convergentes pour le **gaz**, dont la croissance de la production se poursuivra pour ne culminer qu'au-delà de 2040, malgré des progrès tech-

nologiques plus faibles à attendre en production et l'apport controversé de ressources supplémentaires récupérables des gisements d'hydrates de méthane. Les débouchés du gaz seront complétés par sa conversion en pétrole synthétique de haute qualité ou directement en carburant par la technologie Fischer-Tropsch.

Enfin, pour le **charbon**, les réserves actuellement reconnues – dans le cadre d'une exploration très peu active – sont suffisantes pour satisfaire les besoins très au-delà de 2100, même avec une demande largement accrue, notamment dans les grands pays en développement. Là encore les technologies industrielles en progression permettent de transformer une large gamme de charbons en pétrole synthétique par liquéfaction directe ou indirecte via la gazéification.

1.3 LES ÉNERGIES RENOUVELABLES (ENR)

Les ENR offriront dans le long terme un potentiel limité par leur faible densité et les problèmes d'acceptation sociale. L'**énergie hydraulique** (6 % actuellement du bilan mondial) a encore un potentiel de croissance, notamment dans certains pays en voie de développement (Chine et Amérique latine), mais limité par les problèmes d'environnement et d'occupation de l'espace associés aux grands barrages, qui posent d'importants problèmes d'acceptabilité sociale. L'**énergie éolienne** est déjà une technologie mature, qui ne nécessite plus véritablement de recherche amont, mais une veille technologique. Cependant, elle a un potentiel de croissance important dans certaines régions du globe. En dehors des problèmes d'encombrement des paysages et d'acceptabilité, son développement sera lié à la maîtrise de la gestion des réseaux électriques, comprenant une part importante de sources intermittentes, et à la résolution du problème de stockage de l'électricité. La **géothermie** en roche sèche a un potentiel variable selon les régions, qui sera important dans les zones

de fracture. Un potentiel supplémentaire est constitué par la géothermie profonde, dont l'évaluation est pour l'instant impossible en l'absence de technologies crédibles.

Au-delà du développement à soutenir pour l'exploitation de ces ENR, les efforts de recherche se portent sur l'énergie solaire et sur la biomasse, qui présentent les plus gros verrous scientifiques et technologiques à lever. La **biomasse** est la principale ressource renouvelable actuellement (plus de 10 % de l'offre mondiale). Sa transformation thermochimique par voie sèche permet de préparer des charbons, huiles ou gaz de synthèse (H_2 , CO) utilisables pour la production de chaleur, d'électricité, de carburants de substitution. La production de biocarburants par voie humide pourrait constituer un apport de plus en plus important et se substituer de façon significative aux carburants pétroliers en complémentarité avec ceux obtenus par voie sèche. À l'avenir, l'apport de la biomasse sera limité par les contraintes de mobilisation des sols pour les productions énergétiques et la concurrence avec les cultures alimentaires. Pour la France, le potentiel de cette filière est de l'ordre de 30 Mtep.

L'utilisation directe de l'**énergie solaire** a un potentiel considérable, mais ses voies d'application se heurtent à des contraintes économiques, ainsi qu'à des contraintes physiques. Le premier usage, la production de chaleur à basse température, dédiée uniquement aux besoins de chauffage et d'eau chaude, doit progresser par l'amélioration des capteurs et leur intégration dans l'habitat. Le deuxième usage, la production d'électricité photovoltaïque, présente des coûts encore trop élevés et les performances doivent être améliorées pour connaître une diffusion commerciale au-delà de 2020-2030. Enfin, la production à haute température à usage industriel requiert des surfaces importantes pour concentrer la puissance nécessaire. Du fait de l'intermittence de cette énergie, son introduction nécessitera des avancées significatives dans les systèmes de stockage pour satisfaire les besoins d'une demande régulière d'énergie.

1.4 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'énergie nucléaire de fission est actuellement produite à partir du seul noyau fissile existant sur terre, l'uranium-235 (0,7 % de l'uranium naturel) dans des filières à neutrons thermiques et à eau légère (REP, réacteur à eau pressurisée, en France). Au rythme actuel de production d'électricité d'origine nucléaire, les réserves mondiales prouvées dépassent 250 ans. Les développements ont porté sur la sûreté, le taux de combustion et ont abouti à des concepts du type EPR (European Pressurised water Reactor). Ils sont poursuivis par des recherches sur des filières à neutrons thermiques et caloporteur gaz, mais qui visent à travailler à très haute température pour augmenter les rendements, permettre les cycles combinés et si possible la production d'hydrogène par voie thermochimique. Le défi se situe nettement au niveau de la tenue des matériaux à haute température et sous irradiation.

Quelle que soit la filière, la production de déchets, majoritairement présents dans les combustibles déchargés, doit être correctement gérée. Ces déchets, dont la toxicité est essentiellement liée à la radioactivité, sont de deux types : les produits de fission, dont la majorité est à durée de vie courte et moyenne, et les transuraniens (plutonium + actinides mineurs) à durée de vie longue.

L'énergie de fusion thermonucléaire, qui répond pour le long terme au problème de pénurie des ressources fossiles et aux problèmes environnementaux, n'offrira cependant pas de relais possible avant la deuxième moitié, voire la fin de ce siècle.

1.5 CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES ET SOCIALES

Les **contraintes environnementales**, en particulier celles relatives à l'effet de serre, pourraient se concrétiser par le durcissement

des politiques publiques et faire obstacle au vaste déploiement des combustibles fossiles dans l'avenir. Le charbon sera en principe beaucoup plus pénalisé que le gaz naturel, dont l'utilisation pour la production d'un kWh émet deux fois moins de CO₂, les hydrocarbures liquides se situant entre les deux. Ces contraintes inciteront au développement de techniques de séquestration du carbone si la taxation des émissions de GES rentabilise ces solutions. Elles orienteront aussi le courant technologique vers les techniques conduisant à l'hydrogénation du charbon et des pétroles lourds et, en production électrique, vers les techniques couplant gazéification du charbon et conversion efficace. Elles inciteront à une centralisation de la conversion d'énergie et à une distribution en réseau fixe pour faciliter la capture du CO₂.

Ces contraintes se manifestent à travers les conflits et les préférences des utilisateurs, industriels et citoyens, vis-à-vis des nouvelles techniques et de l'implantation des équipements énergétiques. Au travers des problèmes de sensibilité environnementale et d'acceptation sociale, on voit se dessiner une logique d'échanges de risques entre filières. Dans les scénarios du Conseil Mondial de l'Énergie de doublement des besoins d'énergie en 2050, le cumul d'émissions de carbone entre 1990 et 2050 sera 50 % plus élevé, dans l'hypothèse où le nucléaire atteindrait un niveau de 1500 GW en 2050 (320 GW actuellement), ce qui doublerait le volume des déchets nucléaires cumulés. Ainsi, les techniques de séquestration du carbone, comme la mise au point de nouveaux réacteurs moins producteurs de déchets de vie longue seront des réponses utiles, mais pas suffisantes pour relever les défis du long terme. Face à la contrainte climatique, qui conduit à afficher des objectifs ambitieux de réduction des émissions de 75 % d'ici 2050, les États industrialisés, confrontés aux difficultés d'acceptabilité du nucléaire, portent leur effort technologique sur les EnR et l'amélioration de l'efficacité des techniques de conversion et d'utilisation d'énergie.

2 – SITUATION DE LA RECHERCHE ET REFLEXIONS PROSPECTIVES

La recherche dans le domaine de l'énergie est motivée par l'amélioration de l'indépendance énergétique et une limitation drastique des émissions de GES. Cet objectif pourra être atteint par des recherches sur quatre plans complémentaires :

- la production de vecteurs énergétiques sans émissions ;
- l'amélioration des efficacités énergétiques des processus ;
- la compréhension des dynamiques des grands secteurs consommateurs d'énergies finales ;
- la socio-économie des questions énergétiques et l'analyse des politiques publiques aux niveaux nationaux et mondiaux.

2.1 SOURCES D'ÉNERGIE ET VECTEURS ÉNERGÉTIQUES

L'énergie nucléaire de fission

L'avenir de l'énergie de fission passe par des filières plus sûres, l'utilisation de noyaux fertiles et la réduction de la production des déchets. Les deux noyaux fertiles sont l'uranium - 238, qui multiplie la ressource par 140, et le thorium, qui est encore plus abondant. L'uranium ne peut être utilisé que dans une filière à neutrons rapides alors que le thorium peut l'être aussi dans une filière à neutrons thermiques, ce qui demande une quantité de combustible en cœur dix fois plus faible. Le déploiement en est évidemment facilité. En utilisant les REP, et les réacteurs rapides nécessaires pour brûler le plutonium produit dans les REP, pour produire l'uranium - 233 nécessaire au démarrage des réacteurs au thorium,

l'énergie nucléaire pourrait répondre à un quart de la demande énergétique mondiale en 2050. Les recherches sur ces filières se font dans le cadre du forum mondial Génération IV et de programmes EURATOM ; en France, le CEA travaille davantage sur les filières rapides à l'uranium et le CNRS sur la faisabilité scientifique des filières thorium.

La recherche mondiale sur le devenir des déchets nucléaires se focalise sur trois pôles : la séparation poussée et la transmutation, le stockage géologique profond réversible ou non, le conditionnement pour un entreposage de longue durée en surface. La séparation chimique poussée, en prolongeant les techniques actuelles existantes au laboratoire ou par pyrochimie, permet d'avoir les corps séparément et de leur appliquer le traitement le mieux adapté. En particulier, l'incinération par fission ou la transmutation par capture permettent de réduire les produits radioactifs à vie longue en produits stables ou à vie courte mais ils nécessitent des flux très importants de neutrons que seuls des réacteurs peuvent fournir. Ces réacteurs doivent fonctionner en spectre rapide plus efficace pour transmuter, remplir les conditions de sûreté souvent dégradées pour les actinides mineurs et aussi disposer de neutrons supplémentaires. Ceci a entraîné une importante recherche sur le concept et les conditions de fonctionnement des réacteurs sous-critiques, où le réacteur est piloté par les neutrons fournis par un accélérateur via une source de spallation. Les conditions pour la conception et la réalisation d'un démonstrateur européen de réacteur hybride semblent maintenant remplies. Les difficultés attendues pour la réalisation des combustibles solides à base d'actinides mineurs ont relancé le concept de réacteurs à sels fondus, qui est la première voie envisagée pour la filière thorium. Au CNRS, les recherches se font dans le cadre du programme PACE, qui regroupe cinq GDR formés avec les principaux acteurs du nucléaire (CEA, EDF, Framatome, ANDRA et COGEMA) et travaillant sur les déchets et les filières innovantes. Les nouvelles filières basées sur l'uranium devraient produire cent fois moins d'actinides mineurs et la filière au

thorium devrait permettre de gagner encore un facteur 70, rendant ainsi le problème des déchets beaucoup moins critique.

L'énergie nucléaire de fusion

Le contrôle de la fusion thermonucléaire est un objectif extrêmement prometteur puisqu'il s'agit de produire de l'énergie à partir de deutérium abondant dans l'eau de mer. La France s'est engagée dans deux projets simultanés de construction de grosses machines (tokamak et laser mégajoule) correspondant aux deux filières, magnétique et inertielle, de la fusion thermonucléaire contrôlée.

Dans la filière magnétique, le mélange de deutérium-tritium, à l'état de plasma chaud, est confiné par des champs magnétiques dans un tokamak. L'effort international porte sur l'étape de démonstration de faisabilités scientifique et technologique : c'est le projet ITER, un tokamak de très grande taille, qui vise la maîtrise sur des temps longs de plasmas produisant une énergie de fusion une dizaine de fois supérieure à l'énergie injectée. Le CNRS se positionne dans le cadre de la physique amont de ce projet, porté par le CEA au niveau national. Les thématiques clés pour l'optimisation de la configuration magnétique sont : équilibre et stabilité du plasma, compréhension et diagnostic de la turbulence et son impact sur le confinement, génération de courant en phase stationnaire et dynamique des particules alphas issues des réactions de fusion.

Dans la filière inertielle, le plasma chaud est comprimé à l'aide de faisceaux laser ou de faisceaux de particules. Le CNRS dispose d'un « grand instrument » consistant en un ensemble de chaînes laser de grande puissance, situé au laboratoire LULI, avec lequel la communauté CNRS et académique effectue des expériences de physique fondamentale. Par ailleurs, le CNRS a favorisé la création de l'Institut Laser Plasma. Les recherches amont de cette filière portent sur 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'état de la matière dense et chaude, de la physique atomique des plasmas chauds. Les verrous technologiques de cette filière, qui se situent autour du concept d'allumeur rapide, concernent la mise au point de sources d'énergie initiales efficaces, qui mettent le plasma en condition avec une bonne cadence, et la résolution des problèmes liés à la fabrication des cibles, contrainte par le critère d'homogénéité.

Biomasse

De par sa capacité à réaliser recyclage, captage et stockage du CO₂, la biomasse est une source d'EnR dont la production par voie photosynthétique est le puits de CO₂ naturel le plus important sur la planète.

Sa **transformation thermo-chimique** (pyrolyse ou gazéification) permet de préparer des charbons, huiles ou gaz utilisables pour la production de force et de chaleur, d'électricité, de carburants de substitution ou d'H₂. Le développement industriel de ces technologies nécessite des actions de recherche couvrant l'ensemble de la chaîne, depuis la production de biomasse jusqu'à l'utilisation chimique ou énergétique des effluents. Les principaux **verrous identifiés** sont :

- mauvaise connaissance des processus primaires de dégradation thermique de la biomasse ;
- propreté des effluents : des recherches doivent être poursuivies dans le domaine du craquage des vapeurs et goudrons, et de l'élimination des poussières, aérosols, alcalins, NO_x, etc. ;
- maîtrise et rentabilité des procédés : il convient de définir des solutions adaptées aux couplages optimaux entre nature, variabilité, disponibilité, transport et stockage de la biomasse ; type, contrôle et capacité de traitement du réacteur haute température ; optimisation énergétique ; type d'utilisation visée ; données géopolitiques et socio-économiques.

Les procédés de production de biocarburants **par voie humide** sont actuellement développés suivant deux filières : les esters méthyliques d'acides gras (biodiesel/additif diesel) et le bioéthanol/additif essence. Le respect de la réglementation européenne nécessitera en 2010 une production nationale de biocarburants de 3 Mt (soit 6 fois la production actuelle) et européenne de 17 Mt portant sur les additifs essence et diesel. Le problème du biohydrogène est aussi posé.

Sur ces filières traditionnelles, la priorité doit être mise sur le développement de nouveaux micro-organismes, d'enzymes et de procédés performants par intégration des connaissances conventionnelles et celles amenées par les technologies de rupture post génomiques. Des programmes, intégrant l'ingénierie moléculaire (protéines/enzymes) ainsi que l'ingénierie cellulaire (micro-organismes de performance) et l'ingénierie de produits (valeurs d'usage) et de procédés (techniques d'élaboration), doivent être confortés en les plaçant sous contrôle d'écobilans et de critères de développement durable. Les recherches de biocarburants ou additifs doivent conduire à la réalisation de filières de synthèse de produits chimiques intégrant les problématiques de technologies de rupture liées aux sciences du vivant : nouvelles plantes et nouveaux biocatalyseurs.

L'hydrogène

L'hydrogène est considéré comme un des vecteurs d'énergie du futur particulièrement performant. Son utilisation dans des applications mobiles, en particulier pour le transport terrestre, est une des clés pour son développement. Pour cela, il faudra apporter des réponses scientifiques et technologiques à trois problèmes principaux : la maîtrise de la production, du stockage et de la conversion en énergie dans des conditions économiques acceptables.

Son développement nécessitera une forte évolution vers des modes de **production** durables et une augmentation considérable de cette production en terme de volume. Les

modes de production actuels sont basés sur le reformage catalytique d'hydrocarbures d'origine fossile comme le gaz naturel (méthane et alcanes légers) et les gaz issus du pétrole ou du charbon. Ces technologies éprouvées pour des applications stationnaires à large échelle (par exemple production de H_2 pour la synthèse de l'ammoniac) requièrent aujourd'hui un nouvel effort de recherche lié à l'émergence de nouvelles applications et/ou contraintes. Ainsi en est-il de la conversion du gaz naturel en gaz de synthèse (CO et H_2) sur les sites d'extraction (plates-formes offshore) ou la génération de H_2 comme carburant de pile à combustible pour des applications embarquées ou domestiques. Ces applications envisageables sur le court et moyen terme induisent des axes de recherche novateurs et des ruptures technologiques comme la miniaturisation des procédés (nouvelles technologies des mini- et micro-réacteurs/échangeurs, co-générateurs de chaleur et d'énergie électrique), ou l'ultra-purification de H_2 (teneur requise inférieure à 10 ppm de CO , pour les PEMFC) ou des réacteurs de stockage. Comme alternative au reformage d'hydrocarbures d'origine fossile, le reformage catalytique de ressources issues de la biomasse (biogaz, bioéthanol, biohuiles) limite par définition l'accroissement global du carbone atmosphérique, mais requiert un large effort de recherche pour développer à moyen et long terme de nouveaux procédés compétitifs avec les procédés actuels. La production par électrolyse de l'eau pose, selon l'origine de la ressource électrique, le problème du CO_2 (développement de procédés de capture et de séquestration du carbone en cas d'utilisation d'énergies fossiles), ou celui des déchets (cas du nucléaire). De plus, l'énergie nucléaire pourrait apparaître comme une voie intéressante si la mise au point de réacteurs à haute température et de procédés catalytiques de thermolyse de l'eau était engagée sérieusement. Reste à évoquer les cycles thermochimiques qui présentent aujourd'hui un vaste éventail de températures opératoires. Outre le reformage à partir de la biomasse, d'autres contributions des EnR à la production de H_2 pourraient être envisagées, comme l'utilisation de l'énergie solaire concentrée, ou encore des bioprocédés en cours d'exploration : biophotocatalyse et réacteurs biomimétiques associés.

Les méthodologies de **stockage de l'hydrogène** par voies liquide ou gazeuse ont été largement évaluées au cours des dernières années. Pour le stockage en usage mobile, aucune des solutions n'est actuellement satisfaisante. Le stockage par gaz sous pression, actuellement le plus avancé, n'a pas atteint un degré de maturité suffisant pour l'utilisation de réservoirs à haute pression. Les problèmes liés à la fiabilité/sécurité et surtout à la durabilité de ces réservoirs (70 MPa) restent encore ouverts. Le stockage liquide semble difficile pour l'usage mobile car, aux difficultés physiques et techniques liées aux faibles températures, s'ajoute le fort niveau d'énergie nécessaire à la liquéfaction. Le stockage par adsorption ou réaction, avec l'utilisation soit d'hydrures métalliques dans des réservoirs à la pression atmosphérique, soit de matériaux carbonés nanostructurés dans des réservoirs à haute pression (environ 20 MPa), sont des solutions pour lesquelles l'effort de recherche doit être maintenu. En ce qui concerne les hydrures, l'effort actuel porte principalement sur la recherche de systèmes légers à base de magnésium, d'aluminates, voie qui apporte actuellement le maximum de sécurité en terme d'utilisation. Pour les matériaux nanostructurés, la compréhension des mécanismes d'adsorption/désorption et leur modélisation sont à poursuivre. L'élaboration et la caractérisation du matériau idéal restent un verrou scientifique à lever. Un bilan réaliste sur les deux modes de stockage solide devra être effectué. En conclusion, l'effort de recherche dans le domaine du stockage de H₂ est encore très insuffisant compte tenu de la criticité de ce point pour ce vecteur.

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique conduit cependant à des risques liés à la sécurité de son utilisation (contrôle des pertes d'hydrogène).

La chaleur

La forme chaleur des besoins énergétiques en France représente plus de 80 % des usages des combustibles fossiles. L'enjeu du

point de vue des ressources et pour la préservation de l'environnement est très important. La communauté française de la recherche sur les échangeurs compacts et multifonctionnels, internationalement reconnue, doit être significativement renforcée. Les verrous actuels concernent la maîtrise de la physique du changement de phase, en particulier dans le domaine de la microfluidique diphasique, des hautes températures et de la thermomécanique des fluides complexes. Par ailleurs, les efforts en cours sur le stockage par chaleurs sensible et latente, avec des applications pratiques réalistes au niveau industriel, sont à poursuivre et ils restent à développer au niveau de l'habitat et du tertiaire.

L'existence de sources d'énergie thermique mal, voire non utilisées comme les centrales d'incinération, imposent de concevoir des moyens plus efficaces de transport de la chaleur ou du froid que les réseaux existants : les réseaux urbains, transportant de l'eau chaude ou de la vapeur, ne peuvent s'étendre en longueur sous peine de pertes thermiques importantes. Les réseaux de distribution de froid, sous forme de chaleur latente, doivent être développés pour atteindre une économie acceptable sur sites commercial ou résidentiel. De nouveaux concepts, comme celui du transport d'un gaz actif en circuit fermé assurant, par des réactions endo- et exo-thermiques vis-à-vis de solides bien choisis, le transport de chaleur ou de froid sur de longues distances, doivent être développés et expérimentés. L'installation de tels procédés satisfierait l'adéquation ressources et demandes, locales et régionales, avec l'économie correspondante.

L'électricité

Le vecteur **électricité** est le plus répandu en raison de sa facilité d'utilisation et de transport à longue distance. Du fait de la libéralisation des marchés, sa gestion devient un problème très important, qui nécessitera de nouvelles architectures de réseaux. L'introduction de nouvelles technologies de production décentralisées et, en particulier les

EnR à apport intermittent, conduisent à des problèmes de raccordement à grande échelle, d'augmentation et de suivi du trafic, de congestion des réseaux et de viabilité économique des développements envisagés, elle-même contrainte par l'acceptabilité des implantations. Un effort particulier doit être envisagé pour résoudre le problème du stockage de manière économique et adaptée aux usages requis.

L'accroissement inévitable de la **production** d'énergie décentralisée et la transformation de l'énergie électrique en un produit marchand vont nécessiter la construction de nouvelles méthodologies de pilotage, de gestion, de surveillance de la production et des **réseaux**, ainsi que la conception de nouvelles structures matérielles capables de répondre à la dynamique correspondante. Les travaux de recherche devront faire intervenir de fortes composantes informatiques et automatiques, tandis que les architectures des systèmes de production décentralisée devront être repensées et optimisées (microréseaux).

Que ce soit au niveau des réseaux ou des appareils électriques utilisés par les usagers, les recherches sur l'amélioration des rendements sont basées sur l'utilisation généralisée de convertisseurs d'électronique de puissance et sur une approche multiphysique et socio-économique de la conception des produits. Dans le cas des convertisseurs électromécaniques, les efforts portent sur l'accroissement des rendements et de la puissance volumique, avec des études sur les matériaux constitutifs. Dans le cas des appareillages de réseaux, la tendance est d'aller vers des convertisseurs d'électronique de puissance statiques à très haute tension, pour lesquels les composants et les architectures restent à inventer. L'intégration généralisée de l'électronique de puissance dans des dispositifs de plus faible puissance implique de nombreux efforts de conception, de choix de nouveaux matériaux et technologies de mises en œuvre et d'assemblage.

Enfin, dans une logique forte de développement durable, le **stockage** de l'énergie à usage final électrique va devenir une problématique majeure. Il fera essentiellement appel

aux composants électrochimiques qu'il est nécessaire de perfectionner en matière de capacité volumique, durée de vie, recyclabilité, performances et coût. D'autres solutions, telles que le stockage inertiel ou le stockage électromagnétique, de plus faible énergie volumique, mais dont la cyclabilité potentielle est plus élevée, devront également être envisagées. Comme pour la plupart des autres aspects, ce domaine du stockage nécessitera d'importantes études sur les matériaux.

L'autonomie de certains équipements mobiles et de microsystèmes nomades, alimentés par des piles, pourrait être augmentée par l'utilisation de **microsources d'énergie**. Pour un usage faible, l'utilisateur peut servir lui-même de source primaire d'énergie. Ainsi, des recherches doivent porter sur des matériaux aux propriétés électromécaniques ou thermoélectriques adaptées pour les systèmes de conversion de quelques watts. Pour des puissances supérieures ou des usages plus intenses, la miniaturisation de systèmes de conversion à base de combustible (principalement H_2) : micro-turbines, -moteurs, -PACo, constitue une voie prometteuse à développer. La miniaturisation des composants semi-conducteurs entraîne des contraintes thermiques, qui nécessitent de nouveaux concepts de radiateurs (caloducs par exemple). Des avancées significatives restent liées au développement de nouveaux matériaux : supraconducteurs à haute température critique, semi-conducteurs plus performants que Si, diélectriques, matériaux à effet magnéto-calorique géant, etc.

2.2 CONVERSION DE L'ÉNERGIE

Amélioration des efficacités énergétiques

L'efficacité énergétique, mesurée par le rapport entre la quantité d'une forme utilisable de l'énergie et la quantité d'énergie primaire mise en œuvre, gomme, dans la plupart des cas, l'aspect qualitatif de l'énergie (lié au type

d'énergie ou au niveau de température pour la chaleur) ou la réalité des irréversibilités dans les processus de transfert et de conversion énergétiques. Le remède à cette situation passe par une généralisation des **analyses exergétiques** du fonctionnement des systèmes et des procédés, qui associent quantité et qualité des divers types d'énergie. Il conviendra d'aller encore plus loin en y intégrant les aspects économiques, voire les techniques des sciences économiques.

Pour des installations complexes, une telle optimisation nécessite de penser en terme d'intégration énergétique, c'est-à-dire de couplage des systèmes et procédés. Un développement volontariste des installations de **cogénération** (chaleur-force) ou de **trigénération** (énergies thermique, frigorifique et électrique), ainsi que les **centrales à cycles combinés** (gaz-vapeur), qui s'inscrivent dans cette logique, est nécessaire. Ceci nécessite le développement de nouveaux concepts comme la thermodynamique en temps fini et de méthodes d'analyses exergo-économiques. Ces modèles, également utilisables pour une conduite optimisée, seraient de nature à engendrer des économies d'énergie substantielles. De manière plus large, les **cascades énergétiques**, dans lesquelles des procédés présents sur un site plus ou moins étendu sont assemblés en fonction de la nature et de la qualité des énergies mises en jeu, doivent conduire à des économies d'énergie conséquentes. Leur développement se heurte à des problèmes technico-économiques et à l'absence de modèles performants prouvant leur intérêt. Le surdimensionnement des composants de transfert ou de conversion d'énergie est aussi une cause manifeste de mauvaise utilisation de l'énergie primaire, dont l'origine est la méconnaissance de leur comportement en régime transitoire ou hors nominal. Afin de l'éviter, l'effort de recherche doit porter sur le développement de modèles précis et fiables, intégrant le couplage avec des **stockages d'énergie**, ce qui autoriserait une minimisation de la taille des composants, donc des pertes exergétiques.

Pompes à chaleur, machines frigorifiques et thermotransformateurs

La technologie sur les machines à compression est mature, à l'exception de celle relative à la substitution des fluides classiques par des fluides complexes (mélanges non azéotropiques). Cependant, l'amélioration de leurs performances nécessite des études de leur comportement en régime transitoire et de leur commande. Les recherches sur les machines à gaz carbonique, qui n'ont pas d'impact environnemental, sont en phase de démarrage. Des efforts accrus de recherche doivent porter sur la connaissance des transferts de masse et de chaleur d'un fluide supercritique en minicanaux.

Au niveau des procédés à sorption, absorption gaz-liquide ou à sorption gaz-solide (adsorption ou réaction), qu'ils soient dédiés à la production de froid, la production combinée de froid et chaleur ou encore la thermotransformation, les efforts de recherche doivent être orientés vers des machines à triple effet (avec combinaison des deux types de sorption : double effet à absorption et simple effet à sorption solide) pour atteindre des coefficients de performance (énergie utile/énergie primaire) du même ordre que les pompes à chaleur à compression en mode de production de froid positif. Les possibilités de gestion des systèmes à sorption solide dans des phases temporelles différentes sont intéressantes et permettent d'envisager leur couplage avec des sources énergétiques solaires, tout en produisant du froid par exemple de manière continue ou sur demande découplée avec la source.

Combustion industrielle et moteurs thermiques

Les recherches développées pour la production industrielle d'énergie par combustion et la motorisation ont pour objectif principal la diminution des rejets dans l'atmosphère : oxydes d'azote, particules et GES. Pour réduire l'émission de CO₂, on cherche à accroître les rendements énergétiques et diminuer le nombre d'atomes de carbone du combustible.

Les **verrous scientifiques** résident dans le développement et la maîtrise de régimes de combustion moins polluants et plus efficaces (foyers, chaudières ou turbines à gaz terrestres), tout en étant flexibles à un changement de combustible (gaz de synthèse issus de la biomasse, résidus de raffinerie, gaz sidérurgiques, gaz fortement enrichis en hydrogène, etc.). Les flammes sont dans ce cas particulièrement instables et possèdent des cinétiques de combustion encore mal connues. La sécurité des installations et la capture du CO₂ sont également des thèmes à prendre en considération.

Les problèmes d'émission de polluants ont mobilisé les laboratoires de combustion ces dernières années, en particulier, la combustion de mélanges pauvres dans les moteurs à injection directe. La recherche est engagée sur quatre axes principaux :

- les jets diphasiques et la pulvérisation des carburants (cavitation, instabilités interfaciales) ;
- le mélange turbulent dans les moteurs (micro-mélange et mélange tourbillonnaire soumis à une compression) ;
- la combustion en milieu stratifié (propagation et stabilité de flamme en milieu inhomogène en richesse) ;
- la chimie de la combustion (pour les nouveaux carburants en particulier).

Ces travaux débouchent actuellement sur de nouveaux modes de combustion dans les moteurs. Le défi scientifique des prochaines années est focalisé sur la combustion homogène, sans propagation de flamme, où le mélange est auto-inflamé par compression. Le procédé nécessite la poursuite de recherches fondamentales sur l'aérodynamique, le mélange turbulent et la cinétique du carburant utilisé. L'allumage et la dépollution par plasma constituent également des pistes intéressantes.

Les avancées nécessitent une coordination pluridisciplinaire entre mécaniciens des fluides, combustionnistes et cinéticiens, ainsi que mécaniciens et physiciens des solides,

acousticiens, sans oublier les biologistes pour ce qui concerne les effets des rejets sur la santé. Un domaine important est aussi celui du contrôle (notamment, stabilisation des flammes par contrôle actif des écoulements) et de la commande faisant intervenir l'informatique et l'électronique embarquée.

Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque ne représente qu'une part infime de la production d'énergie électrique mondiale (~ 0,01 %), mais elle connaît une forte croissance : 35 % par an depuis 1997. La principale filière de fabrication (90 % du marché mondial) est à base de silicium cristallin en plaquettes. Actuellement, les meilleurs rendements commerciaux de conversion photovoltaïque atteignent 16 % sur de grandes surfaces. Un des verrous de cette filière est le coût élevé de la matière première. Le temps de retour énergétique est aussi particulièrement élevé (4 ans). Outre le problème industriel de créer une source spécifique de Si « solaire », il faut améliorer la méthode de purification du Si métallurgique par des techniques plasma. Il faut aussi diminuer l'épaisseur des plaques minces ou rubans par un sciage innovant (électro-chimique). Enfin, le piégeage optique et la structure des contacts doivent être améliorés.

Pour les couches minces sur substrat de verre ou plastique, on distingue la filière au Si amorphe hydrogéné (rendement 6-8 %) et les filières émergentes à base de composés du type Cu(InGa)Se₂, CdTe, etc. dont les rendements sont meilleurs, mais les méthodes de fabrication industrielle se cherchent encore. À moyen terme (5-15 ans), l'enjeu est le développement industriel de ces couches avec la mise au point de procédés à haut débit et grande surface (rendement 12-15 %). Trois solutions doivent être explorées :

- une voie silicium à haute température permettant la cristallisation en gros grains de couches de plusieurs microns d'épaisseur et le report de ces couches, soit par épitaxie en phase liquide, soit par dépôt chimique en phase vapeur ;

– une voie à base de silicium amorphe, micro-cristallin ou polymorphe. Il s'agit de transférer des solutions qualifiées en laboratoire en procédés viables industriellement et d'intégrer ces nouvelles couches dans de nouvelles structures du type tandem Si/SiGe et Si/ μ Si ;

– une voie à base de chalcogénures, où la maîtrise du matériau, de ses interfaces et de son dopage est critique. Les deux méthodes de dépôt concurrentes sont l'électrochimie et la co-évaporation. L'enjeu est le développement de modules (30 x 30 cm²).

Une troisième filière à base de semi-conducteurs organiques commence à être étudiée, mais les meilleurs rendements n'atteignent que 3 % en début de vie (500 h). Enfin une recherche fondamentale a été initiée sur les dispositifs à matériaux nano-structurés.

Pour une échéance à long terme (> 15 ans), il convient d'explorer les potentialités de matériaux à très bas coût et les concepts de cellules innovantes à très haut rendement. Pour les matériaux organiques, les principaux verrous sont la stabilité dans le temps et sous éclairage, ce qui implique des études de base sur les matériaux (copolymères, nouvelles molécules, dérivés des fullerènes, pigments), sur les couches actives (réseaux interpénétrés, films de Langmuir-Blodgett, cristaux liquides) et sur les dispositifs (rôle des interfaces). Pour les nouveaux dispositifs à structure tandem, la conversion par luminescence et multi-photons, avec des matériaux nanocomposites, doit être étudiée. Il faudra envisager l'intégration de la conversion en puissance à l'échelle de la cellule. Enfin, il conviendra d'améliorer la gestion des systèmes intégrés aux réseaux et dans l'habitat.

Conversion du rayonnement solaire en chaleur

Le solaire thermique suscite un regain d'intérêt grâce au développement de nouvelles générations de capteurs à basse température plus efficaces, permettant notamment d'être

intégrés aux capteurs photovoltaïques pour permettre le développement de systèmes de cogénération chaleur/électricité dans l'habitat. Au niveau mondial, la filière électricité solaire à haute température a fait ses preuves, mais son développement industriel est freiné par les investissements lourds nécessaires. En France, aucune réalisation industrielle n'est envisageable sans disposition financière incitative. Les progrès sont attendus par les recherches sur des matériaux à changement de phase ou sur des cycles de transport de la chaleur intégrant la fonction de stockage depuis le concentrateur jusqu'à la centrale thermique, permettant ainsi une production continue d'électricité. L'utilisation d'instruments solaires à grande concentration permet aussi d'étudier des cycles thermochimiques de production d'H₂ (> 1 000 °C), pouvant être associés dans le futur aux centrales nucléaires de trigénération (électricité, chaleur et H₂).

La recherche de capteurs solaires plans permettant de délivrer de la chaleur entre 150 à 200 °C, avec une fonction de stockage de la chaleur intégrée, est à développer car de tels capteurs hybrides seraient des plus utiles et économiquement acceptables en site isolé.

Le développement de nouveaux systèmes thermochimiques utilisant des capteurs solaires hybrides à basse température est à privilégier : la source de chaleur issue de tels capteurs doit être transformée en chaleur utile quel que soit son niveau (eau chaude sanitaire, chauffage) et en froid comme le froid positif (climatisation, réfrigération) ou fortement négatif (congélation). Ainsi, la domotique thermique du futur, au niveau de l'habitat individuel comme celui du tertiaire, pourrait voir le jour et compléter réellement le concept de la maison « zéro énergie ».

Ces efforts sont à conjuguer avec la levée de verrous se situant au niveau des structures optiques et des vitrages autonettoyants.

Piles à combustible (PACo)

Les PACo permettent de transformer directement l'énergie chimique de combustion d'un combustible (hydrogène, alcools, hydrocarbures,

etc.) 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 de l'ordre de 40 % (qui peut être nettement supérieur si l'on opère en cogénération). Les applications visées concernent le transport (véhicule électrique, auxiliaires de puissance), la production localisée d'énergie électrique (centrale de 1 à 10 MW, habitat de 1 à 10 kW, avec cogénération de chaleur) et les appareils électroniques portables (micro-ordinateur, téléphone, etc.).

Le CNRS concentre ses efforts sur les PEMFC (piles à membranes polymères protoniques opérant de 70 à 90 °C) et les SOFC (piles à oxydes solides opérant de 850 à 1 000 °C), qui font l'objet de recherches importantes tant au niveau européen qu'au niveau international.

Il faut développer de nouveaux composants du cœur de pile ayant des propriétés spécifiques améliorées et de nouveaux concepts de gestion des fluides, de la chaleur et des flux d'énergie. La maîtrise des champs thermiques et des champs d'humidité est cruciale pour leur durée de vie. Pour les PEMFC (et leur variante à combustion directe du méthanol, DMFC ou d'alcools), de nouvelles membranes protoniques visant à remplacer le Nafion® et fonctionnant à plus haute température (120 à 150 °C) sont à mettre au point, afin d'augmenter la vitesse des réactions électrochimiques et de mieux évacuer la chaleur. De nouveaux catalyseurs doivent être développés, notamment du côté de la réduction de l'oxygène, où les surtensions sont responsables d'un tiers des chutes de rendement énergétique et il faut améliorer leur dispersion. Par ailleurs, il serait important de développer des catalyseurs spécifiques pour utiliser des alcools dans une pile à combustion directe.

Pour les SOFC, il faut mettre au point de nouvelles céramiques permettant un fonctionnement à plus basse température (650 à 700 °C) avec de meilleurs matériaux de cathode. Des catalyseurs anodiques permettant le reformage interne du combustible sont à développer.

Pour résoudre les problèmes de stockage et de transport de l'hydrogène, des combustibles alternatifs sont à rechercher, notamment

ceux issus de la biomasse (éthanol, etc.). Des membranes anioniques permettront de concevoir des PACo alcalines, tout solides, fonctionnant à température ambiante avec des combustibles alcools (applications portables).

Capture et séquestration du CO₂

La capture du CO₂ au moment de sa production (principalement par la combustion du charbon et d'hydrocarbures), son transport et sa séquestration sont les points clés de la protection environnementale.

Les méthodes de capture du CO₂ diffèrent notablement selon les sources d'émission (sites industriels centralisés ou sources diffuses). Les trois voies actuellement envisageables pour capturer le CO₂ sont : la cryogénie, la sorption et la séparation membranaire. Des recherches sont développées actuellement dans ces trois domaines, en particulier sur l'adsorption et la séparation membranaire. Pour les procédés de sorption, les verrous actuels sont surtout d'ordre technologique et, pour mieux appréhender le problème, une approche technico-économique sera nécessaire. Pour la séparation membranaire, l'élaboration de nouveaux matériaux (forte perméabilité et sélectivité accrue), la conception de procédés innovants pour fabriquer les membranes et la mise au point de procédés hybrides intégrant la transformation du CO₂ par réaction chimique pour une utilisation comme source de carbone sont les voies sur lesquelles doivent porter les efforts de recherche.

Pour séquestrer le CO₂, plusieurs solutions sont possibles mais la plus prometteuse tant sur le plan de la sécurité à long terme que sur le plan économique semble être le stockage géologique du CO₂. Ce stockage pourrait être réalisé dans des gisements pétroliers ou gaziers épuisés ou en phase de récupération assistée, dans des aquifères profonds (roches sédimentaires ou plutoniques) ou dans des couches de charbon. Afin de pouvoir passer du laboratoire, ou du site pilote, à un site de stockage industriel, de nombreuses questions fondamentales doivent être résolues :

– en géochimie : **la réactivité chimique, à différentes échelles de temps et d'espace**, de fluides riches en CO₂ avec les principaux minéraux de l'encaissant. Plus précisément, il faut mieux connaître la stabilité des phases qui incorporent du CO₂, les mécanismes et les médiateurs d'incorporation (biogéochimiques, géochimiques), les cinétiques de formation/destruction de ces phases et les transferts de matière associés ;

– en géophysique : **modéliser et surveiller** la stabilité physique du réservoir lors de la montée en pression, la perméabilité/porosité du réservoir en réponse à l'injection de CO₂, le fluage des roches soumises à une circulation d'un fluide réactif, l'évolution à long terme (pour quelques siècles, voire plus) des propriétés mécaniques du réservoir.

2.3. GRANDS SECTEURS D'UTILISATION DE L'ÉNERGIE

Bâtiments résidentiels et tertiaires

Les recherches sur l'usage de l'énergie en thermique de l'habitat se classent en quatre rubriques, relatives aux volumes intérieurs et aux ambiances, aux enveloppes, à l'interaction bâtiment /environnement proche et aux systèmes. Elles combinent approches expérimentales et numériques pour maîtriser les ambiances intérieures, identifier des stratégies de contrôle de ventilation hybride ou optimiser la conception des enveloppes, intégrant composants solaires et matériaux composites, par exemple. Divers outils de simulation sont développés pour faciliter l'éco-conception des bâtiments (analyse du cycle de vie), comprendre l'impact du micro-climat urbain sur le bâti, analyser différentes solutions de stockage.

Les besoins de recherche concernent l'optimisation (efficacité, durabilité, etc.) des matériaux (superisolants, revêtements, etc.), des composants (murs diodes, double peau, vitrages et façades actives, etc.), de l'hybridation des sources (solaire

thermique et photovoltaïque, PACo, géothermie de surface, etc.) et leur intégration au bâti (en très grande majorité existant déjà), de la gestion des vecteurs (chaleur, électricité, H₂, etc.), du stockage (chaud et froid, gestion de l'inertie, etc.). La modélisation doit devenir un élément fédérateur majeur, impliquant des outils de dialogue qui manquent actuellement entre diverses échelles (usager/activité/confort, interaction sources/thermo-aéraulique/enveloppe, relation bâtiment/environnement) et donnant accès à une vision système (intégration des composants, contrôle actif, etc.). Elle doit progresser vers la réduction de modèles non linéaires (convection, rayonnement) et permettre le développement de plates-formes virtuelles destinées à la validation des modèles de composants, de systèmes et de bâtiments. Cette démarche devrait permettre de concevoir jusqu'à des bâtiments producteurs d'énergie, couplés en réseaux (quartiers, villages, etc.) et qui devront être assortis de démonstrateurs.

Il est enfin indispensable d'analyser les verrous institutionnels et sociétaux susceptibles de freiner l'insertion de ces nouvelles technologies économes, voire productrices d'énergie, dans les bâtis neufs et existants.

Secteur des transports

Les transports sont d'importants utilisateurs d'énergie. Si l'on excepte le cas des systèmes à alimentation électrique extérieure, tels que les motrices ferroviaires alimentées par caténaire, les véhicules doivent transporter à la fois le réservoir de carburant et le système de conversion, c'est-à-dire le moteur. Cette contrainte conditionne le choix des solutions techniques relatives au système de conversion et au type de carburant utilisé. Pour les véhicules routiers (78,5 % de la consommation de ce secteur), le moteur thermique à mouvement alternatif paraît incontournable pour de nombreuses années encore, parce qu'en terme de pollution locale les solutions existantes sont efficaces (catalyseur et filtre à particules) et surtout parce que le rendement énergétique est sans concurrence prévisible à moyen terme (en particulier dans le cas du moteur diesel à injection directe à haute

pression). L'emploi de véhicules à motorisation hybride nécessite aussi de disposer d'un moteur classique à haut rendement. Pour le transport ferroviaire (4,9 %) à motorisation thermique, on ne voit pas, à moyen terme, d'autre système que le moteur diesel (ou éventuellement la turbine, dont le rendement reste cependant comparativement bas). En aéronautique (10,4 %), le réacteur double flux sera probablement présent pour au moins 50 à 60 ans ; cependant, l'utilisation de l' H_2 est à envisager.

Les progrès à court et moyen termes portent donc essentiellement sur l'amélioration des procédés de combustion et les gains potentiels sont importants, ce qui explique les efforts des motoristes. Pour la traction routière, la PACo est envisagée à long terme et devrait s'imposer à court terme pour les auxiliaires. Pour le carburant, le contenu énergétique volumique et massique de l'essence et du gazole reste sans concurrence : le gaz naturel, le gaz de pétrole liquéfié ou l'hydrogène exigent des réservoirs embarqués très lourds. Pour les véhicules de transport, on risque donc de continuer à utiliser longtemps un carburant hydrocarboné liquide à température ambiante et à pression atmosphérique, provenant des pétroles fossiles, classiques ou non, de la transformation du gaz naturel, du charbon ou de la biomasse. Les recherches à mener portent sur l'optimisation énergétique de la fabrication de ces carburants. Le cas de H_2 comme carburant, soit avec un moteur thermique classique, soit avec une PACo doit faire l'objet de recherches et d'analyses technico-économiques intensives.

Procédés industriels

L'industrie est un utilisateur important d'énergie (# 25 %) sous toutes ses formes : charbon, fuel, gaz et électricité, essentiellement pour le chauffage ou le refroidissement des procédés de transformation des fluides, des matériaux, des produits et des systèmes. Dans de nombreux cas, le type d'énergie employé est intimement lié au procédé mis en œuvre. Ainsi, au-delà d'une utilisation rationnelle de l'énergie en termes de Mtep – et l'industrie a

déjà progressé sur cette voie –, c'est souvent l'optimisation de la qualité du produit final qui demande aujourd'hui des recherches nouvelles impliquant la gestion énergétique des procédés. Deux secteurs importants – eu égard à leur budget énergie – sont analysés : sidérurgie et agro-alimentaire.

La **sidérurgie** utilise la thermique pour conférer aux produits de nouvelles propriétés d'emploi, via des traitements thermométallurgiques ou thermomécaniques. C'est le cas de certains procédés sidérurgiques où interviennent des solides dont une partie du carbone diffuse dans le matériau final ou réduit les oxydes du produit initial. Il est évident que la liaison thermique-propriété d'usage, notamment via les refroidissements par ébullition convective, est particulièrement souhaitée : il s'agit de développer une science du refroidissement de produits défilant sous des jets d'eau. Il faut également noter, qu'en matière de développement durable, une utilisation optimale de l'eau dans tous les procédés énergétiques doit être mise en œuvre (*Voir* échangeurs).

Le secteur **agro-alimentaire** (7,5 Mtep, proche de celui de la sidérurgie) fait appel à trois grands types de traitements thermiques : la pasteurisation/stérilisation à visée sanitaire, la transformation (séchage, cuisson, etc.) et la conservation, principalement sous régime de froid. Les efforts de recherche doivent porter sur l'amélioration énergétique des équipements (cycles thermiques et fluides utilisés), et sur les systèmes énergétiques intégrés (co- ou trigénération). Parallèlement, l'amélioration de la performance énergétique des procédés de traitements thermiques nécessite :

- une meilleure compréhension des lois de comportement des fluides complexes, liquides et semi-liquides alimentaires, au cours de leur traitement thermique (suspensions, émulsions, fluides diphasiques à forte teneur en phase solide, etc.) ;

- l'étude des interactions et rétroactions des traitements thermiques, principalement sur ces fluides alimentaires, dans les échangeurs multifonctionnels ;

– la recherche et le développement de techniques alternatives aux procédés thermiques classiques (ultrafiltration, lumière pulsée, haute pression, traitement flash Hyper Haute Température, etc.).

2.4 SOCIO-ÉCONOMIE DES QUESTIONS ÉNERGÉTIQUES

Depuis les années soixante-dix, les recherches économiques et sociologiques appliquées aux questions d'offre et de demande d'énergie ont été guidées par trois enjeux : la compétitivité, la sécurité énergétique et la protection de l'environnement. Les recherches récentes ont été orientées par le besoin d'évaluation des impacts environnementaux, l'analyse des innovations énergétiques et la modélisation économique, qui permet désormais de tester de façon satisfaisante les chocs de prix énergétiques mondiaux, l'impact de surprises technologiques et l'effet des politiques climatiques.

Dans le futur les progrès sont à faire dans le prolongement des trois axes précédents. D'abord l'évaluation des nouvelles filières technologiques et de leur prolongement en terme d'analyse de cycle de vie devrait être effectuée de façon approfondie pour les nouvelles options technologiques se présentant aux décideurs : filières de l' H_2 , de la biomasse et de la séquestration du CO_2 venant en complément des filières classiques. Le développement d'une approche globale de comparaison du risque de changement climatique et du risque nucléaire aurait une pertinence sociale. L'approche multicritère devrait être formulée pour tester des compromis entre points de vue variés sur les coûts et risques environnementaux et les retombées technologiques et industrielles de différentes options.

En économie de l'innovation, il convient d'améliorer la compréhension de l'efficacité des politiques de R&D et d'innovation de moyen et de long terme dans la lignée des travaux actuels de l'OCDE sur l'efficacité des systèmes

nationaux d'innovation. De même, la contribution de la sociologie à la compréhension des mécanismes de percée de nouveaux systèmes techniques comme ceux associés au vecteur hydrogène ou des conditions de reprise du développement d'autres grands systèmes comme le nucléaire doit être encouragée. En sociologie, le besoin de mieux comprendre les comportements de consommation dans différents secteurs nécessite plus de recherches sur les relations entre la consommation d'énergie, les modes de vie, l'organisation spatiale (logement, mode de transports, petite et grande distribution). De plus la compréhension des verrous sociaux liés à l'acceptabilité des techniques nucléaires et de certaines EnR font aussi l'objet de recherches importantes, qui se portent sur les modalités de participation du public aux décisions.

Dans le domaine de la modélisation, l'urgence des questions adressées à la socio-économie va se renforcer avec le durcissement des objectifs de réduction des émissions et le renouveau actuel de sensibilité aux problèmes de sécurité énergétique. Cela suppose de concevoir des politiques technologiques volontaires et d'imaginer des modifications des comportements de consommation sans mise en question du bien-être. Cela nécessite un certain nombre de progrès de méthodes pour concevoir des scénarios cohérents, évaluer les coûts et analyser les contraintes liées à la difficulté de percée de nouveaux systèmes comme les techniques hydrogène.

Trois voies de progression sont à privilégier. Il y a d'abord un effort à faire pour asseoir une prospective « normative » de très long terme, qui doit décrire un futur de réduction volontaire des émissions et de prélèvements sur les ressources à l'horizon 2050-2100 et tracer la trajectoire vers cette cible à l'aide de modèles dynamiques. Il convient ensuite d'allonger l'horizon de référence des modèles existants à 2050. Enfin une intégration plus poussée des recherches socio-économique et climatique doit être poursuivie par la mise en chantier de modèles dits « intégrés », associant modèles de prospective énergétique et macroéconomiques avec des modèles climatiques permettant d'intégrer la boucle de conséquences du changement climatique sur l'économie.

3 QUELLES ORIENTATIONS POUR LES RECHERCHES SUR L'ÉNERGIE

La recherche dans le domaine de l'énergie est une composante fondamentale de toute politique de développement durable. Face à ce problème mondial, la réponse à une demande croissante d'énergie avec une réduction des émissions de GES ne peut être réalisée qu'à partir du développement **d'énergies non émettrices de CO₂** et de la **capture du CO₂ avec sa séquestration**. Cependant, la mise en place d'une base de ressources plus large et plus flexible nécessite d'encourager l'amélioration des **efficacités énergétiques** et les **économies d'énergie**. Une brève analyse des orientations de certains pays industrialisés, différentes selon leurs ressources présentes ou potentielles et de leur vision des problèmes socio-économiques, est présentée afin de positionner les directions des recherches à privilégier : l'hydrogène, l'énergie de l'habitat, la chaîne du carbone et l'énergie nucléaire. Elles doivent largement être accompagnées de recherches en sciences humaines et sociales.

3.1 OBSERVATION DE LA SITUATION À L'ÉTRANGER

L'impact de la prise en compte des problèmes environnementaux et de sécurité dans les politiques énergétiques conditionnent l'orientation des efforts technologiques vers la recherche d'un « mix » technologique et d'une efficacité supérieure, qui limitent les prélèvements sur les ressources épuisables, les impacts sur la dépendance énergétique et les performances environnementales. En considérant deux pays importants, qui se sont positionnés récemment, les États-Unis et la Grande-Bretagne, on voit que si

l'environnement et le développement durable sont les priorités affichées dans les deux pays, l'indépendance énergétique revient au premier rang. C'est une des priorités aux USA, alors que le retour à une dépendance dans le futur en Grande-Bretagne amène à en faire aussi un objectif important. La ressource charbon reste aux USA une ressource pour le futur, ce qui n'est pas le cas de la Grande-Bretagne.

La primauté du marché et des incitations de la concurrence sur les stratégies de R&D et d'innovation des firmes est forte dans les deux pays, plus forte en Grande-Bretagne qu'aux USA ; la Grande-Bretagne cherche à intégrer sa politique de R&D dans le cadre de partenariats européens.

Les priorités affichées aux États-Unis sont relatives à la technologie H₂, la capture du CO₂ et sa séquestration, sans oublier la biomasse et un effort significatif sur la croissance des rendements énergétiques. La technologie de fission commence à être reprise en considération, avec des projets d'étude de nouveaux concepts. En Grande-Bretagne, la R&D et la politique d'innovation sont orientées vers les EnR, les techniques efficaces et surtout la technologie hydrogène. En Allemagne, un retour très marqué vers l'exploitation propre du charbon est à souligner.

L'Europe a édicté ses priorités : 21 % de la production électrique doit être d'origine renouvelable (hydraulique y compris), 4 à 6 % des additifs pour la combustion doivent être issus de la biomasse. Enfin « Génération Hydrogène » est l'un des programmes prioritaires de la Communauté ainsi que le photovoltaïque avec la création d'une plate-forme photovoltaïque européenne. La position de l'Europe face à l'énergie nucléaire n'est pas unique pour la fission ; en revanche la fusion thermonucléaire est un de ses objectifs à long terme.

3.2 PROPOSITIONS ET RECOMMANDATIONS

Pour faire face au double défi induit par le changement climatique et l'évolution des besoins énergétiques au niveau mondial, il faut réduire les émissions des GES par quatre d'ici 2050 et développer des sources d'énergie et des systèmes énergétiques performants et compétitifs. Provoquer des ruptures technologiques qui permettent d'accéder à un avenir meilleur ne sera possible que grâce à des avancées des connaissances significatives, nécessitant des recherches dans les différentes disciplines de base mentionnées dans le corpus du texte. Cinq axes de recherche à privilégier ont été définis.

Vecteur Hydrogène

La recherche de méthodes de **production durable** doit rester une priorité, elle ne sera toutefois pas monomode. L'effort de recherche sur l'amélioration des rendements énergétiques et sur les méthodes à faible génération ou à séquestration du carbone est pour le moyen terme à poursuivre. Le challenge pour le **stockage** reste le développement de solutions performantes et sûres. L'effort sur la fiabilité des stockages par gaz sous pression et sur les performances du stockage solide (hydrures légers, matériaux-nanostructurés, etc.) doit être poursuivi. Des solutions hybrides ou composites (gaz-hydrure, gaz-basse température, hydrure-matériaux nanostructurés, etc.) sont à explorer de façon importante car elles peuvent être le compromis optimal. Aux efforts sur les méthodologies précédentes, il faut adjoindre des recherches sur les systèmes de stockage (enveloppes externes, échangeurs thermiques, etc.). Le développement de l'**utilisation** de ce nouveau vecteur, en particulier dans les **piles à combustibles** doit s'intensifier, en particulier pour le secteur mobile. Des actions sont à engager pour trouver d'autres systèmes d'exploitation de ce vecteur.

Par ailleurs, une analyse des risques devra être menée, sous contrainte d'acceptation par le public.

L'énergétique de l'habitat : l'hybridation des sources

Les apports en EnR au niveau du résidentiel et du tertiaire sont à intensifier et à diversifier pour assurer une progression du confort, d'excellentes conditions de santé, enfin l'évolution de la demande sociétale. Les ressources, rayonnement solaire converti en chaleur/froid et électricité, la chaleur/fraîcheur issue de la géothermie de surface doivent être exploitées tout en respectant l'adéquation entre besoins et ressources. Il en est de même, surtout en site isolé, pour la pyrolyse-gazéification de la biomasse en vue de la production de gaz utilisés pour de la cogénération ou l'alimentation de PACo. Les fonctions de stockage et puissance variable devront être intégrées aux procédés à mettre en place dans l'habitat en respectant la distinction : résidentiel ou tertiaire neuf, et ancien. Dans le cas du neuf, l'interconnexion entre les habitats voisins devra être privilégiée, par la mise en place de réseaux de gestion thermique (chaud et froid) et de réseaux électriques, pouvant conduire à des habitats producteurs d'énergie. Dans le cas de l'existant, du confort et du bien-être nouveaux (silence, qualité de l'air) doivent permettre l'acceptation, au sens économique, de l'intégration de ces nouvelles ressources. De nouveaux procédés sont donc à concevoir et à développer pour atteindre ces objectifs.

La chaîne du carbone : des ressources fossiles et de la biomasse à la séquestration du CO₂

La stabilisation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère, avec les contraintes du doublement de la demande énergétique mondiale d'ici 2050 et la division par quatre

des émissions de CO₂ nécessite d'agir sur l'ensemble de la chaîne productrice de CO₂ et de pouvoir capturer et séquestrer efficacement le gaz émis.

En matière de combustion classique, les carburants issus de la biomasse, des résidus de raffinerie, des charbons et des déchets doivent permettre une combustion propre des gaz de synthèse H₂ et CO, ce qui nécessite de dominer la stabilité des flammes, l'allumage du mélange combustible par plasma froid. L'effort de recherche au niveau pyrolyse-gazéification de la biomasse nécessite la maîtrise du génie des procédés correspondants. Les biocarburants peuvent être produits à court et moyen terme par les filières bioéthanol et éthers méthyliques, le long terme visant la production d'hydrogène. Des voies nouvelles comme la photodissociation de l'eau par les algues visent des résultats sur le long terme.

Si la capture du CO₂ peut être résolue à court terme mais avec un surcoût, sa séquestration nécessite le développement de recherches amont à long terme, centrées sur les géosciences : piégeage sous forme de liquide ou fluide supercritique, dissolution dans une phase fluide, piégeage hydrodynamique, sans oublier la biologie végétale (augmentation du rendement de la photosynthèse).

Matériaux

La mise au point de nouveaux matériaux, avec des fonctionnalités spécifiques à l'application visée, est nécessaire pour concourir aux nombreuses avancées évoquées dans ce document. Parmi les verrous correspondants, on peut citer :

- matériaux pour la capture et la transformation de l'énergie solaire (capteurs thermiques et photovoltaïques) ;

- matériaux résistant à haute température, pour un fonctionnement à haut rendement de certaines machines comme les moteurs thermiques, les chaudières, les turbines, etc. ;

- matériaux pour des convertisseurs et transformateurs d'énergie (matériaux pour cycles thermochimiques, convertisseurs électromécaniques, etc.) ;

- matériaux pour le stockage et le transport des vecteurs énergétiques (hydrogène, électricité, chaud ou froid) ;

- matériaux de cœur de PACo à propriétés structurales et électriques contrôlées (PEMFC ou SOFC) : nouveaux polymères pour les membranes protoniques, nouveaux catalyseurs d'électrodes, couches minces, électrolytes solides à conductivité ionique élevée, etc.

En liaison avec le développement de nouveaux matériaux et de leurs procédés d'élaboration, les démarches globales, du type « Analyse du cycle de vie », devront être encouragées pour relier matériaux, fonctionnalités énergétiques, contenu énergétique et pollution environnementale.

Le développement de ces thèmes de recherche nécessite de :

- prévoir des plates-formes avec des démonstrateurs pour l'intégration et l'évaluation de nouveaux concepts ;

- renforcer les équipes CNRS et universitaires trop peu nombreuses dans ces domaines où l'on attend beaucoup de la recherche ;

- rechercher une synergie avec des organismes nationaux et l'implication de partenaires industriels (par exemple, CEA, IFP, EDF, pétroliers, INRA, CIRAD, BRGM, CSTB, ADEME, Saint-Gobain, Bouygues, etc.) ;

- structurer l'implantation en réseaux et la création de pôles scientifiques et techniques.

Énergie nucléaire

Les recherches sur l'utilisation de **l'énergie de fission** dans le cadre de Génération IV et de l'EURATOM sont clairement orientées vers l'utilisation durable des ressources : utilisation des noyaux fertiles, accroissement des rendements par la montée en température, cycle

combinés et production d'hydrogène, sûreté. Le besoin commun à toutes les filières du futur, en plus de la physique des réacteurs, est la disponibilité de matériaux capables de tenir à haute température sous irradiation et souvent en atmosphère corrosive. La filière thorium thermique à sels fondus, retenue en priorité par le CNRS, demande une étroite collaboration entre la physique des réacteurs et la chimie qui va se traduire par un programme commun de recherche en cours d'élaboration.

La **fusion thermonucléaire**, solution d'avenir pour la production d'énergie électrique, réalise la convergence des critères d'abondance des ressources et d'impact environnemental faible. Les recherches sur cette voie ont une échelle de temps très longue : la démonstration est à 30-50 ans (ITER en 2010/20, DEMO en 2030/50) pour une production mondiale vers la fin du siècle. Le développement du programme fusion requiert autant de développements de haute technologie que d'études de physique fondamentale. Pour la fusion inertielle, l'effort engagé par le CNRS doit être maintenu. La structuration et le développement de la recherche, en synergie avec le CEA, sont essentiels pour renforcer le potentiel de la filière magnétique. Le projet ITER, en mobilisant les communautés CEA, CNRS et universitaires, permettra des collaborations sur les thèmes clés et de nouveaux problèmes spécifiques au réacteur (concepts de couvertures, neutronique, matériaux) pourraient être abordés.

4 - EN CONCLUSION

Si nos capacités et connaissances actuelles guident ces réflexions et éléments stratégiques, permettant la mise en place de dispositifs maîtrisés ou maîtrisables sans risquer de mettre à mal l'équilibre socio-économique actuel, la vision à plus long terme doit être abordée dès aujourd'hui, bien qu'elle ne s'appuie que sur nos connaissances actuelles. Un effort important sur la recherche de nouveaux concepts ou la recherche de ruptures est impératif.

La mise en place d'une instance ou structure de coordination de ces recherches sur les énergies durables et acceptables devient nécessaire. Au-delà de ses relations avec les industriels, elle devra s'intégrer dans la politique européenne, y faisant apparaître la vision du problème énergétique national, tout en participant à des actions communes. Sur le plan international, un aspect important concerne les pays en voie de développement : pour de tels pays, énergétiquement dépendants, une politique de recherches finalisées devra être développée en coopération avec ces états.

Pour la mise en œuvre de ces recherches, une approche multidisciplinaire conjuguant les dimensions scientifiques (liées aux lois de la nature), la dimension sociale, la dimension économique et la dimension environnementale s'impose. Le CNRS, organisme de recherche regroupant l'ensemble de ces disciplines, a donc tous les atouts pour se positionner sur ce terrain.

ANNEXES

ANNEXE 1 : LISTE DES ACRONYMES

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
BRGM	Bureau de recherche géologique et minière
CEA	Commissariat à l'énergie atomique
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CODEMA	Compagnie générale des matières nucléaires
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
DMFC	Pile à combustion directe du méthanol
EnR	Énergie renouvelable
EPR	European pressurised water reactor
EURATOM	Communauté européenne de l'énergie atomique
GEST	Gaz à effet de serre
IFP	Institut français du Pétrole
INRA	Institut national de la recherche agronomique
ITER	International thermonuclear experimental reactor
LULI	Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
PACo	Pile à combustible

PEMFC	Pile à combustible à membrane protonique
REP	Réacteur à eau pressurisée
SOFC	Pile à combustible à oxyde solide
tep	Tonne équivalent pétrole

ANNEXE 2 : LISTE DES AUTEURS

Jean-Pierre Bertoglio

Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique – LMFA (UMR5509), École centrale de Lyon, 36 avenue Guy de Collongue 69134 Écully cedex
Contributions : Analyse générale, combustion

Alain Bonneville

Laboratoire de géosciences marines – LGM (UMR7097), Institut de physique du globe de Paris, Tour 24-25 1^{er} étage, 4 place Jussieu, BP 89, 75252 Paris cedex 05
Contributions : CO₂

Yves Brunet

Laboratoire d'électrotechnique de Grenoble (UMR5529), ENSIEG – BP 46 – 38402 Saint-Martin-d'Hères cedex
Contributions : Électricité

Jean Delsey

Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité – INRETS, chemin de la croix blanche 13300 Salon de Provence
Contributions : Transports

Édouard Fabre

CNRS, Paris
Contributions : Analyse générale

Dominique Finon

Centre international de recherche sur l'environnement et le développement – CIRED (UMR8568), 45Bis, avenue de la Belle Gabrielle 94736 Nogent-sur-Marne cedex
Contributions : Socio-économie

François Forest

Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier
– LEM, Université Montpellier
2, Case courrier 079, 860 rue St. Priest
34090 Montpellier cedex
Contributions : Électricité

Édouard Freund

Institut Français du Pétrole – IFP, 1 – 4,
avenue de Bois-Préau
92852 rueil-Malmaison cedex
Contributions : Ressources fossiles

Alix Gicquel

Laboratoire d'ingénierie des matériaux et
des hautes pressions – LIMHP (UPR1311),
Université Paris Nord (Paris XIII),
Institut Galilée, 99 av. J.B Clément,
93430 Villetaneuse
Contributions : Stockage hydrogène

Gérard Goma

Laboratoire biotechnologie et bioprocédés –
LBB (UMR5504), Institut national des sciences
appliquées de Toulouse, 135, av. de Rangueil
31077 Toulouse cedex 4
Contributions : Biomasse

Patrick Hug

IRSID, Voie Romaine B.P.320 –
57214 Maizières-Les-Metz
Contributions : Procédés industriels

André Lallemand

Centre de thermique de Lyon – CETHIL
(UMR5008), Institut national des sciences
appliquées de Lyon, Bât. Sadi Carnot,
Domaine Scientifique de La Doua
69621 Villeurbanne cedex
Contributions : Efficacité énergétique

Monique Lallemand

Centre de thermique de Lyon – CETHIL
(UMR5008), Institut national des sciences
appliquées de Lyon, Bât. Sadi Carnot,
Domaine Scientifique de La Doua
69621 Villeurbanne cedex
Contributions : Analyse générale

Claude Lamy

Catalyse en chimie organique – LACCO
(UMR6503), Université de Poitiers,
bat. Chimie, 40 av. du recteur Pineau,

86022 Poitiers cedex
Contributions : Piles à combustible

Christian Le Brun

Laboratoire de physique subatomique
et de cosmologie – LPSC (UMR5821),
Université Joseph Fourier (Grenoble I),
53 av. des martyrs 38026 Grenoble cedex 1
Contributions : Énergie nucléaire fission

Thierry Lebey

Laboratoire de génie électrique de Toulouse
– LGET (UMR5003), Université Paul Sabatier
(Toulouse III), bat. R1B3, 118 Route de
Narbonne 31062 Toulouse cedex 4
Contributions : Électricité

Jacques Lédé

Laboratoire des sciences du génie chimique
– LSGC (UPR6811), Institut National
Polytechnique de Lorraine, ENSIC,
1 rue Grandville BP 451 54001 Nancy cedex
Contributions : Biomasse

Arnold Migus

Institut laser et plasmas – ILP, Talence
Contributions : Énergie nucléaire fusion

Claude Mirodatos

Institut de Recherches sur la Catalyse,
2 av. Albert Einstein
69626 Villeurbanne Cedex
Contributions : Hydrogène

Jean-Michel Most

Laboratoire de combustion et de détonique
(LCD (UPR9028), École nationale supérieure
de mécanique et d'aérotechnique, Téléport 2,
1 av. Clément ADER BP 40109
86961 Futuroscope cedex
Contributions : Combustion

François Penot

Laboratoire d'études thermiques (LET
(UMR6608), École nationale supérieure de
mécanique et d'aérotechnique, Téléport 2, 1
avenue Clément ADER BP 40109
86961 Futuroscope cedex
Contributions : Bâtiments

Dominique Perreux

Franche Comté Électronique Mécanique
Thermique et Optique (FEMTO-ST
(UMR6174), Université de Franche-Comté,

UFR Sciences, route de Gray,
25030 Besançon cedex
Contributions : Hydrogène

Jérôme Perrin

Air Liquide, Jouy en Josas
Contributions : Énergie solaire photovoltaïque

Denis Pesme

École Polytechnique, 91128 Palaiseau cedex
Contributions : Énergie nucléaire fusion

Jean-Bernard Saulnier

Laboratoire d'études thermiques (LET
(UMR6608), École nationale supérieure de
mécanique et d'aérotechnique, Téléport 2,
1 av. Clément ADER BP 40109

86961 Futuroscope cedex
Contributions : Analyse générale

Bernard Spinner

Institut de science et de génie des maté-
riaux et procédés – IMP, Rambla de la
Thermodynamique Tecnosud,
66100 Perpignan
Contributions : Analyse générale

Michel Trinité

Complexe de recherche interprofessionnel
en aérothermochimie – CORIA (UMR6614),
Université de Rouen, Site Universitaire du
Madrillet BP 12
76801 St Étienne Rouvray cedex
Contributions : Combustion

