



Rapport d'activités

2002-2006

Programme Interdisciplinaire

Energie

Sommaire

<u>Présentation du Programme Interdisciplinaire Energie</u>	<u>5</u>
Les objectifs du Programme	5
L'organisation et les moyens du Programme	5
Les objectifs des Groupes d'Analyse Thématique	7
Les appels à projets du PIE	9
<u>Bilan général du Programme Interdisciplinaire Energie</u>	<u>11</u>
Les thématiques des projets (2002-2006)	11
La rédaction d'un livre blanc : les réflexions en matière de prospective	12
Le suivi des actions de recherche	13
Les relations avec des instances nationales et internationales	13
Des actions diverses	14
Quelques bilans statistiques du PIE	15
<u>Activités scientifiques des projets de recherche</u>	<u>21</u>
Filière hydrogène, piles à combustible	21
Bâtiment	23
Biomasse, combustion et CO ₂	25
Energétique, thermique	28
Electricité	33
Energie nucléaire	36
Socio-économie	36
<u>Activités des GAT et prospectives</u>	<u>39</u>
GAT "Filière hydrogène et piles à combustible"	40
GAT "Bâtiment"	46
GAT "Biomasse - Combustion - CO ₂ "	50
GAT "Efficacité énergétique"	56
GAT "Nucléaire du futur"	60

GAT "Socio-économie"	61
<u>Conclusion</u>	<u>65</u>
<hr/>	
<u>Annexes</u>	<u>67</u>
Annexe 1 (sur CD-ROM) Livre Blanc : « Une politique de recherche et développement pour des énergies durables»	69
Annexe 2 Liste des projets	71
Annexe 3 (sur CD-ROM) Rapports d'activités des projets de recherche	77
Annexe 4 Laboratoires impliqués dans les thématiques des GAT	79
Annexe 5 (sur CD-ROM) Rapports d'activités des GAT	93

Préambule

Parmi les préoccupations majeures du XXIème siècle figurent au premier rang le problème de l'énergie, d'une part, au plan de la maîtrise de la demande, d'autre part, de la sécurité des conditions d'approvisionnement. Mais ces préoccupations sont d'autant plus intenses qu'il faut faire face, au niveau planétaire, à trois défis majeurs. Le premier défi est lié aux changements climatiques engendrés par le rejet dans l'atmosphère de gaz à effet de serre dont les conséquences peuvent être dramatiques à long terme si rien n'est fait pour le maîtriser. Le deuxième défi de ce siècle concerne l'épuisement de certaines ressources, en particulier du pétrole dont le maximum de production devrait être atteint vers 2030. La croissance de son coût sera inéluctable et s'accompagnera de tensions géopolitiques majeures, liées à des réserves énergétiques géographiquement disséminées et à une limitation des flux de production. Le troisième défi relève de la préservation de la santé humaine et de l'accroissement du confort. En effet, l'acceptation par notre société de nouveaux modes de vie impliquant des économies d'énergie, notamment en matière de transports, passe par une amélioration de la qualité de la vie.

Pour relever ces défis, la mise en place d'une politique de recherche et développement est impérative. C'est dans ce contexte que s'est inscrit le **Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS**. Il résulte de réflexions initiées par le Département SPI du CNRS sur les problèmes de l'énergie. Dès juin 2001, des groupes de réflexions thématiques, réunissant des partenaires de différentes origines (organismes de recherche, industriels, etc.), ont été mis en place et ont travaillé autour de quatre axes thématiques :

- ☛ nouvelles ressources énergétiques,
- ☛ maîtrise des vecteurs énergétiques,
- ☛ procédés propres et impact environnemental,
- ☛ socio-économie de l'énergie.

Le séminaire de Cargèse a clôturé, en mars 2002, l'ensemble de ces réflexions et les conclusions qui en sont issues ont servi de base à l'orientation du Programme et à l'appel à projets, lancé en 2002.

Ce Programme, qui a débuté en mai 2002, a pris fin en mai 2006, bien que certains projets, mis en place en 2004, ne soient pas terminés. Au cours de ces quatre années, le Programme, grâce à une collaboration réelle et efficace entre les partenaires des projets, a permis à différentes communautés de se connaître et de dialoguer, ce qui est le gage de progrès plus rapides. Ceci a été possible grâce à l'interdisciplinarité de la plupart des projets (75 % des projets ont associé des équipes appartenant à différents départements scientifiques du CNRS ou établissements publics). Grâce aux nombreuses études réalisées par les Groupes d'Analyse Thématique (GAT) en matière de prospectives, le Programme a aussi constitué une force de propositions en matière d'orientations de programmes de recherche ; une partie de ces résultats figure dans un livre blanc intitulé «Une politique de recherche et développement pour des énergies durables».

Dans le présent rapport sont consignées et résumées les principales activités du Programme. Devant la richesse des travaux réalisés, il a été décidé de joindre intégralement tous ces travaux (livre blanc, rapports d'activités des GAT, rapports finaux des projets) dans un CD-ROM joint à ce rapport et qui sera également consultable sur le site web du Programme.

Il est apparu au travers des cinq colloques organisés par le Programme que l'ensemble des participants attache une grande importance aux collaborations entre équipes de recherche. Elles ont permis des avancées significatives dans certains domaines comme il apparaîtra dans ce rapport. Aussi, je me réjouis de la continuité de ce Programme, placé sous la direction de Jean-Bernard Saulnier. En confortant sa dimension européenne, voire internationale, la préparation de projets européens devrait être facilitée.

Avant de conclure ce préambule, je voudrais rendre hommage à Bernard Spinner, décédé le 9 novembre 2004. Après avoir mis en place le Programme, l'avoir dirigé durant plus de deux ans, Bernard Spinner a laissé sa direction pour des raisons de santé. Je tiens à remercier tout particulièrement Bernard pour l'ardeur et la passion qu'il a su mettre dans l'animation de ce Programme de grande ampleur puisqu'il a réuni des chercheurs de 136 laboratoires ou organismes. Il a su nous communiquer son enthousiasme, sa vision de la thermodynamique et sa « culture » sur l'énergie.

Enfin, je tiens à remercier tous les participants du Programme, acteurs des projets et animateurs des GAT. Ils ont permis au CNRS de contribuer à l'effort fait au niveau national pour évoluer vers un développement durable de l'énergie. La mobilisation de cette communauté, en collaboration étroite avec d'autres organismes et des industriels, permettra d'apporter des réponses quant à la production d'énergie à un coût raisonnable et au respect de l'environnement et d'identifier de nouveaux concepts ou des ruptures.

Monique Lallemand

Avril 2007



Présentation du Programme Interdisciplinaire Energie

Les objectifs du Programme



L'importance de l'effet de serre sur l'atmosphère et l'environnement, la croissance de la demande énergétique, la recherche de l'autonomie énergétique et la raréfaction dans un proche avenir des ressources fossiles ont conduit, ces dernières années, l'ensemble des pays industrialisés et de certains pays en développement à rechercher des solutions permettant d'évoluer vers un développement durable. Le développement durable implique une approche qui doit viser, d'une part, à limiter la consommation d'énergie et les émissions polluantes, d'autre part, à remplacer les énergies fossiles par de nouvelles sources d'énergie «propres». En accompagnement de ces objectifs majeurs se situent deux autres volets essentiels, plus génériques, la maîtrise des vecteurs énergétiques et la socio-économie de l'énergie.

En France, la consommation énergétique finale de l'ensemble des secteurs en 2005 représente 160,6 Mtep. Les secteurs où la demande énergétique est la plus forte sont celui des transports (50,4 Mtep, 31 %) en baisse de 0,8 % depuis 2004 et celui du résidentiel-tertiaire (68,2 Mtep, 42,5 %) en hausse de 0,6 %. Cette situation est sensiblement la même pour tous les pays industrialisés. Une autre demande très forte est celle de l'électricité, qui au niveau mondial est produite à 60 % par des ressources fossiles, pour lesquelles il n'existe guère d'alternatives à court terme. Chaque pays adopte une politique énergétique durable fonction de ses ressources, présentes ou potentielles, de sa vision économique et sociale et de son indépendance énergétique (49,8 % pour la France en 2005).

A l'issue du Colloque de Cargèse, quatre axes stratégiques à privilégier en recherche et développement ont été définis. Les grandes orientations du Programme sont basées sur ces conclusions (tableau 1).

L'organisation et les moyens du Programme

Le **Programme Interdisciplinaire Energie** (PIE) du CNRS a été mis en place en mai 2002. Le directeur scientifique du Programme est Victor Sanchez, Directeur du Département Sciences Pour l'Ingénieur (SPI). Le Directeur du Programme (Bernard Spinner auquel a succédé Monique Lallemand en 2004) est entouré, pour animer le Programme, de trois Directeurs adjoints (2002-2004 : E. Fabre, D. Finon, M. Lallemand, 2004-2006 : D. Finon, A. Kiennemann, J.M. Most). La Direction assure l'exécution du Programme et la répartition des moyens. Un conseil scientifique et un comité de pilotage aident la Direction du Programme, d'une part, à définir les orientations du Programme, d'autre part, à préparer les appels à projets, à désigner les experts chargés d'évaluer les projets déposés, à sélectionner les projets. On y trouve des représentants du MENESR, du CNRS, du CEA, de l'ADEME, de la DGA, ainsi que la Direction du Programme.

Tableau 1 : Orientations du Programme (2002)

Axes	Thèmes	Objectifs généraux
Nouvelles ressources énergétiques	Biomasse	Production : gazéification, voie enzymatique et micro biologique
	Solaire	Photovoltaïque : Si massif, couches minces, polymères
		Thermique : habitat, électricité thermique, thermochimie
Nucléaire	Optimisation : sécurité, efficacité énergétique	
Maîtrise des vecteurs énergétiques	Electricité	Nouveaux concepts : réseaux, composants, stockage
	Chaleur	Nouveaux concepts : production de froid/chaud, récupération, conversion, stockage, transport à longue distance
	Hydrogène	Production, transport, stockage, sécurité
Conversion Procédés propres Environnement	Combustion	Moteurs, chaudières, nouveaux combustibles
	Piles à combustible	PEMFC - SOFC
	Procédés industriels	Efficacité énergétique, échangeurs, systèmes multi-échelles
	Cogénération	Procédés combinés
	Habitat	Habitat bioclimatique, ambiances
		Couplage de différentes sources
Gaz à effet de serre	Captage, traitement, séquestration	
Socio-économie	Déterminants de la demande	Acceptabilité économique et sociale
	Modèles et données	Prise en compte des pays émergents
	Environnement institutionnel et réglementation	Normes et législation, diffusion de l'innovation, sûreté économique et sociétale

Trois modes d'action ont été retenus par le Programme :

- ▶ pour chaque thématique, mise en place d'un Groupe d'Analyse Thématique (GAT) sous la responsabilité d'un coordonnateur ;
- ▶ réalisation de projets de recherche impliquant de préférence de 2 à 5 équipes de recherche, si possible interdisciplinaires, sur une durée de 2 à 3 ans ; l'identification d'une entreprise intéressée par le développement du projet est un élément favorable ;
- ▶ mise en place de projets exploratoires d'une durée de 1 an. Ils ont une fonction d'exploration et de synthèse sur des domaines innovants.

Pour la première année de fonctionnement du Programme, les projets de recherche retenus ont été financés par un soutien propre du CNRS.

En février 2003, le budget du PIE a été complété par les contributions du MENESR et de la DGA, sous la forme d'une **Action Concertée Energie** CNRS-MENESR (AC Energie).

L'année suivante, dans le cadre du Fonds National de la Science (FNS), le MENESR en partenariat avec la DGA, le CNRS et l'INRS a lancé une **Action Concertée Incitative «Energie, conception durable»** (ACI - ECD), thématiquement plus large, dont l'une des quatre thématiques est l'Energie.

De par la diversité du cadre dans lequel ont été réalisés les différents projets, leurs modalités de financement (soit le CNRS, avec le soutien de la DGA, soit le MENESR), de remise de rapports et de possibilités de recrutement de doctorants ont été différentes. Selon un accord entre le Ministère et le CNRS, ces rapports ont été remis à ces deux instances ainsi qu'à la DGA pour les années concernées. Tous les projets retenus ont fait l'objet d'une présentation au Colloque annuel organisé par le PIE.

Les Groupes d'Analyse Thématique et les projets exploratoires ont été financés par le CNRS.

Pour la totalité des projets mis en place, des GAT et du fonctionnement du Programme, quelle que soit l'origine du financement, le budget global s'est élevé à environ 8,5 M€, ce qui représente en moyenne 2,1 M€ par an. La contribution respective du MENESR, du CNRS et de la DGA est la suivante : 17 %, 67 % et 16 %. Il convient d'ajouter à ces financements, les frais de personnels ayant participé aux projets et aux GAT. Pour la totalité du Programme et sur une base de 325 équivalents-temps plein (environ 50 % de chercheurs ou enseignants-chercheurs, 36 % de post-doctorants et doctorants, 14 % d'Ingénieurs, Techniciens, Administratifs (ITA)), les salaires des personnels représentent un montant de l'ordre de 80,8 M€, soit un budget consolidé de 89,3 M€.

Les objectifs des Groupes d'Analyse Thématique

Dès 2002, douze GAT ont été mis en place pour 2 ans afin d'identifier et de hiérarchiser les verrous de recherche dans les thématiques notées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Champ d'expertise des GAT (2002-2004)

- Biomasse Energie
- Cellules photovoltaïques du futur
- Piles à combustible et leur gestion
- Production et stockage de l'hydrogène
- Réseaux et stockage de l'électricité
- Habitat
- Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration
- Thermique
- Production, stockage et transport du froid et de la chaleur
- Combustion et capture du CO₂
- Nucléaire du futur : fission et fusion thermonucléaire contrôlée
- Socio-économie

Sous la responsabilité d'un coordonnateur, un GAT est une cellule d'échanges et de discussions rassemblant des spécialistes reconnus dans le thème, chercheurs CNRS, universitaires ou d'autres organismes et des industriels. Parmi leurs missions, on peut citer :

- l'analyse de l'état actuel de la recherche dans la thématique du GAT, avec ses forces et ses faiblesses,
- la mise en place et structuration d'une communauté pérenne,
- le ciblage des recherches prioritaires à faire émerger permettant des progrès quantifiables,
- l'interface avec des organismes de recherche, Ministères, Missions, ANR, ADEME, GdR, Réseaux,
- l'aide à l'information des organismes de tutelle,
- la mise en place d'écoles thématiques, régulières et reconnues.

Ces douze GAT ont largement contribué à la rédaction du livre blanc intitulé «Une politique de recherche et développement pour des énergies durables».

A la fin des deux ans de vie de ces GAT, leur intérêt est apparu à l'évidence pour tous. Aussi, ils ont été reconduits pour 2 ans, mais en réduisant leur nombre à cinq du fait de nombreux recouvrements. Les grandes thématiques représentées font l'objet du tableau 3. La socio-économie apparaissant comme une

thématique tout à fait transverse, des membres de cette thématique sont intervenus dans tous les GAT où le besoin s'en est fait sentir.

Tableau 3 : Champ d'expertise des GAT (2004-2006)

- Filière hydrogène, Piles à combustible
- Bâtiment
- Biomasse, combustion, CO₂
- Efficacité énergétique
- Nucléaire du futur

La synthèse des activités des GAT sera présentée dans le bilan général du Programme en ce qui concerne tous les résultats globaux et dans la quatrième partie pour les activités spécifiques à chaque GAT.

Les appels à projets du PIE

Au cours de ce Programme, trois appels à projets ont été lancés sur les trois premières années.

Pour *l'appel à projets lancé en 2002*, les axes retenus par thématique sont ceux mentionnés dans le tableau 1. Ce sont 15 projets de recherche d'une durée de 2 ans qui ont été sélectionnés.

En *février 2003*, *l'appel à projets* de l'AC Energie concernait des recherches à caractère innovant impliquant des ruptures technologiques au niveau de :

- ▶ l'amélioration de l'efficacité des usages énergétiques,
- ▶ la réduction de la demande des énergies fossiles dans les domaines des transports et du résidentiel /tertiaire,
- ▶ la capture du CO₂,
- ▶ les formes diverses de stockage et de transport de l'énergie.

Vingt deux projets de recherche de 2 ou 3 ans ont été sélectionnés ainsi que 9 projets exploratoires (durée 1 an).

L'objectif principal de *l'appel à projets de 2004* concernait la réduction de l'usage d'éléments carbonés dans l'ensemble des formes d'énergie utilisées, compatible avec un développement et une compétitivité économique réalistes. Ces recherches ont principalement trait au vecteur hydrogène, à la capture du CO₂, à la biomasse et à l'habitat. Ce sont 19 projets (2 à 3 ans) qui ont été mis en place.

Une synthèse des principaux résultats des recherches de ces 65 projets figure dans la quatrième partie.



Bilan général du Programme Interdisciplinaire Energie



Dans cette partie sont consignés principalement des résultats concernant l'activité générale du Programme, le bilan des projets en termes de potentiel humain, de production scientifique, le partenariat avec d'autres instances nationales, la préparation de la phase actuelle (2006-2009) du Programme Energie, etc.

Les thématiques des projets (2002-2006)

Les thématiques des 65 projets réalisés entre 2002 et 2006 peuvent être regroupées globalement selon celles des GAT à quelques exceptions près puisque le contour des GAT a évolué au cours des quatre années.

Filière hydrogène, piles à combustible

C'est certainement la thématique qui, dans le Programme, avec 18 projets a fait l'objet du soutien le plus important. Ainsi 7 projets ont été dédiés aux piles à combustible, avec des études portant principalement sur le cœur des piles. L'étude de la production d'hydrogène a fait l'objet de 4 projets, en 2004. Un gros effort a été consenti sur le stockage de l'hydrogène au travers de 7 projets portant sur des recherches allant du stockage dans des matériaux nanocarbonés ou dans des hydrures métalliques, au stockage sous pression, voire des solutions hybrides.

Bâtiment, photovoltaïque

Bien que le problème de l'énergie dans l'habitat constitue un problème crucial puisqu'il représente 42 % de la consommation énergétique nationale, cette thématique n'a bénéficié que de 9 projets dont 1 seul dédié au bâtiment. Les 8 autres projets ont traité du solaire photovoltaïque, principalement des matériaux eux-mêmes, mais aussi, par exemple, de l'intégration du solaire hybride dans le bâti.

Biomasse, combustion, CO₂

Sur cette thématique, 10 projets ont été réalisés. Leur répartition est équilibrée entre les trois domaines : 3 projets concernaient la biomasse, 3 autres projets ont traité de la capture du CO₂ et de sa séquestration à long terme ; enfin 4 projets avaient trait à la combustion de combustibles non conventionnels tels des mélanges enrichis en hydrogène ou des combustibles issus de la biomasse.

Energétique - thermique

Cette thématique, qui est très large et interdisciplinaire, a fait l'objet de 14 projets. Des études de base en thermodynamique, menées au travers de 2 projets comprenant des analyses technico-exergo-économiques, ont permis de rassembler la communauté nationale traitant de ces domaines. Le refroidissement efficace de systèmes, à différentes échelles, a fait l'objet de 4 projets. L'efficacité de machines thermiques à cycle inverse a été traitée par 1 projet. Dans le domaine des énergies

renouvelables, 2 projets ont couvert l'énergie solaire thermique, respectivement à basse température et à haute température. Le stockage de chaleur ou de froid a fait l'objet de 3 projets pour l'intensification des échanges thermiques dans les stocks et l'amélioration de leur compacité. Enfin, les 2 derniers projets ont eu pour objectif la recherche de solutions pour le transport de chaleur ou de froid à longues distances.

Electricité

Cette thématique, présente initialement dans les objectifs du Programme, n'a pas fait l'objet d'affichage dans le dernier appel à projets. Bien que ce soit un vecteur énergétique de grande importance pour la vie de tous les jours, seuls 8 projets ont été retenus. Ils portaient, pour 6 d'entre eux, sur des composants divers allant des capacités de puissance recyclables à l'électronique de puissance haute tension, etc. Les 2 autres projets ont traité de problèmes de réseaux électriques.

Energie nucléaire

Seuls 2 projets relatifs au nucléaire sont apparus dans le Programme car cette thématique est largement traitée dans d'autres cadres (Programme PACEN (Programme sur l'Aval du Cycle et l'Energie Nucléaire, ...)).

Socio-économie

Au cours des trois appels à projets, cette thématique a été encouragée par le programme, qui a soutenu 4 projets dont on peut regretter le faible caractère interdisciplinaire.

La rédaction d'un livre blanc : les réflexions en matière de prospective

A l'issue de deux années de travail depuis la préparation et la mise en place du Programme, un livre blanc, intitulé : **«Une politique de recherche et développement pour des énergies durables»** a été écrit en accord avec les directives de l'ouvrage sur les énergies de N. Fontaine, intitulé «Vers une politique durable» (MINEFI, 7 novembre 2003). Ce texte complet du livre blanc du CNRS sur la recherche en Energie, de 245 pages, a été terminé en décembre 2003 et largement diffusé au début 2004, auprès des instances nationales, auprès d'organismes et de toute la communauté des chercheurs. Il figure intégralement sur le CD-ROM ci-joint (annexe 1) et il est disponible sur le site du Programme : <http://energie.cnrs.fr/>.

Il est le fruit du travail de toute la communauté qui s'est mobilisée dans les différents domaines retenus autour des coordonnateurs des 12 GAT (tableau 2). Au début du rapport, les principes fondateurs d'une politique énergétique sont rappelés succinctement ainsi que les grandes orientations pour la stratégie de la recherche à développer à moyen terme et à long terme. Les quatre directions de recherche qui ressortent sont :

- la technologie hydrogène et les piles à combustible,

- ▶ l'habitat autonome avec les énergies renouvelables,
- ▶ la chaîne du CO₂ : de la combustion propre jusqu'à la capture et la séquestration du CO₂,
- ▶ la production d'électricité par fission et fusion thermonucléaires, sa distribution et son stockage.

Dans le livre blanc, chacun de ces domaines de recherche est détaillé en 2 à 3 pages.

Le suivi des actions de recherche

L'organisation du suivi des actions de recherche a été réalisée tout d'abord au travers de présentations effectuées chaque année par les équipes concernées lors du Colloque Energie du Programme. Ainsi, six colloques ont été organisés par le Programme. Le premier, préalable à la mise en place du Programme et qui a eu lieu à Cargèse, a traité de l'orientation du Programme. Les colloques suivants se sont déroulés à :

- ▶ Perpignan en collaboration avec le laboratoire PProcédés, Matériaux, Energie Solaire (PROMES) de Perpignan (2002),
- ▶ Poitiers en collaboration avec le Laboratoire de Combustion et Détonique (LCD) et le Laboratoire d'Etudes Thermiques (LET) de Poitiers (2003),
- ▶ La Hague en collaboration avec AREVA (2004),
- ▶ Grenoble en collaboration avec le l'ENSIEG et l'INPG (2005) et
- ▶ Aix-les-Bains avec le concours de l'Université de Savoie et l'Institut National de l'Energie Solaire (INES) (2006). Pour chaque colloque, tous les projets ont fait l'objet d'une présentation des objectifs, puis des études en cours et enfin des avancées réalisées. Chaque projet terminé a fait l'objet d'une double expertise, organisée conjointement avec le Ministère pour l'AC Energie.

Les relations avec des instances nationales et internationales

Le PIE, par l'intermédiaire de ses directeurs et des responsables de GAT, a participé et participe encore à différentes actions au niveau national visant à dégager une stratégie de recherche pour les 15/20 ans à venir et à orienter la politique énergétique de la France. Ainsi, des experts du CNRS ont participé au rapport de l'Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) sur l'«Etat actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables». Ce rapport a été publié en décembre 2001 après l'audition de 170 représentants des industries de production et de consommation d'énergie. Pour le second rapport de l'OPECST, publié en 2006 et intitulé «Les apports de la science et de la technologie au développement durable», 102 personnes ont été auditionnées à l'étranger et 115 en France parmi lesquelles un certain nombre d'acteurs du PIE.

Une contribution au «Rapport sur la stratégie de recherche dans le domaine énergétique» réalisé par la Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières (DGEMP) est à mettre à l'actif du Programme également.

Depuis la mise en place de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), différents chercheurs, reconnus pour leurs compétences, participent aux Comités scientifiques et aux Comités de pilotage des différents programmes de l'ANR.

Les responsables de GAT et les Directeurs du Programme ont contribué largement à la rédaction du rapport de conjoncture du CNRS de 2004, dans le cadre de l'atelier «Energie : ressources, conversion, utilisation».

Pour l'appel à projets 2003 de l'AC Energie, un soutien financier a été apporté par la DGA. Différentes réunions d'avancement des projets ont été programmées ainsi qu'une présentation de la synthèse des résultats. Au terme de la réalisation des projets, un rapport final a été remis à la DGA en novembre 2006, présentant une synthèse des résultats ainsi que des conclusions et perspectives de recherche par thématique.

Le Programme est venu en appui de différentes collaborations de recherche portant sur l'énergie photovoltaïque pour trois projets : « Erbaphot », « Reducop » et « Sinergies », associant, selon le projet, le CNRS, l'ADEME, le CEA et Photowatt International.

On peut noter également la contribution d'une dizaine de participants au Programme à des cycles de Conférences «Rencontres *Image & Science*», organisées par CNRS/Images en partenariat avec le Département SPI du CNRS et le Monde diplomatique, relatives aux énergies propres du futur.

A l'échelle européenne, le PIE est représenté au sein de l'ERA-NET INNER (Innovative Energy Research) et contribue activement au déroulement de ce programme, qui offre une base pour de futurs développements de coopérations. Par ailleurs, un représentant du PIE a régulièrement suivi les séminaires franco-allemands sur l'énergie.

Des actions diverses

La mise en place dès 2004 d'**Écoles Thématiques** destinées à des chercheurs travaillant sur les axes thématiques du Programme a vu le jour. C'est le cas de l'**Ecole de Thermodynamique** ou celui de l'**École Energies & Recherches**. Cette dernière école, soutenue par le Programme, s'adresse aux doctorants ou post-doctorants travaillant dans un domaine de recherche proche de la problématique générale de l'énergie. Le but de cette école est de donner aux doctorants une formation de base sur les différentes sources et vecteurs d'énergie du futur. Elle s'est tenue en mars 2004 et en mars 2006.

L'information sur les activités du Programme a largement été diffusée à tous par le biais d'un site web, dont le nom a évolué en fonction de son hébergement. Une solution pérenne semble avoir maintenant été trouvée car ce site est hébergé par le CNRS : <http://energie.cnrs.fr/>. On y trouve les activités du Programme terminé, mais aussi les activités du Programme en cours. En particulier, tous les rapports finaux des projets y figurent.

Une autre action à mettre au crédit du Programme Energie est la traduction du russe en français, puis la publication du livre «Sadi Carnot» (1796-1832) aux Presses universitaires de Perpignan, dont l'auteur est V. M. Brodianski. Bien plus qu'une biographie, ce livre est une rétrospective sur l'évolution

raisonnée et critique, conduite par Carnot et d'autres savants après lui, d'une science de base : la thermodynamique appliquée. La parution française de cet ouvrage russe est due à l'initiative du Professeur Bernard Spinner, premier Directeur du Programme Energie.

Quelques projets du Programme ont fait l'objet de la deuxième «lettre Energie» des Techniques de l'Ingénieur, qui fut distribuée aux participants du Colloque d'Aix-les-Bains. Elle a été suivie par d'autres publications du même type dans les lettres 6, 7 et d'autres à venir.

Dans le cadre de la mise en place du Programme Interdisciplinaire Energie 2, une journée de préparation du Programme a été organisée par Jean-Bernard Saulnier à Cachan le 26 juin 2006. Cette journée a réuni des participants CNRS et universitaires ainsi que des industriels et représentants de différents organismes. La matinée fut dédiée à une présentation par thématique des prospectives effectuées par chaque responsable de GAT. Durant l'après-midi, des ateliers de travail ont eu lieu sur :

- ▶ l'hydrogène et les piles à combustible (PACo),
- ▶ l'électricité propre : photovoltaïque, thermoélectricité, stockage électrochimique et énergie marine,
- ▶ l'efficacité énergétique,
- ▶ le bâtiment,
- ▶ des thématiques transversales : socio-économie de l'énergie, environnement et développement durable, matériaux.

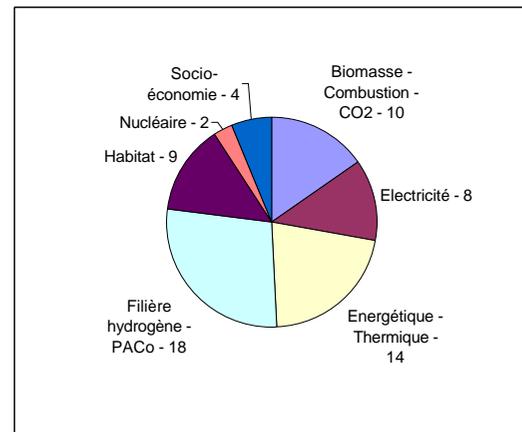
Ces réflexions ont contribué à fixer les orientations du Programme Interdisciplinaire Energie 2 (2006-2009) et à jeter les bases de l'appel à projets lancé en février 2007.

Quelques bilans statistiques du PIE

Tous les éléments présentés ci-dessous concernent l'ensemble des projets quelle que soit l'origine du financement (CNRS, Ministère, DGA).

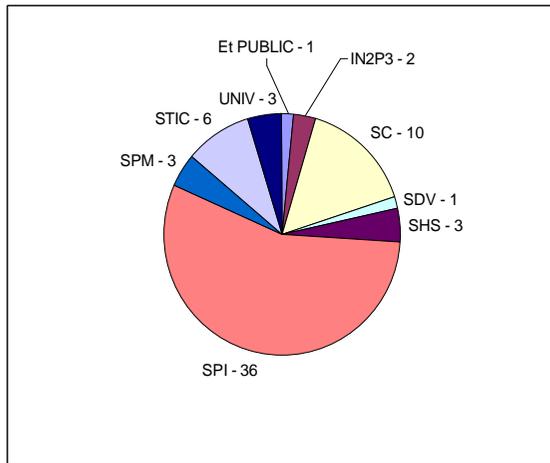
Les thématiques du Programme

Dès sa mise en place, les orientations du Programme ont été clairement définies. Elles ont donné lieu à des projets dans les sept thématiques présentées précédemment. Sur les 65 projets du Programme, la répartition des projets est représentée sur le schéma ci-contre. Comme de nombreux projets sont pluridisciplinaires, cette répartition a été établie selon la thématique principale du porteur de projet. Le plus gros effort a été consenti sur la thématique «Hydrogène - Pile à combustible». Ensuite, vient la thématique «Energétique-Thermique» avec 14 projets de recherche. Les thématiques «Habitat» et «Biomasse-Combustion-CO₂» ont bénéficié de 9 et 10



Nombre de projets par thématique selon le porteur du projet

projets respectivement, cependant avec un nombre plus élevé de projets de recherche en « Biomasse-Combustion-CO₂ » qu'en « Habitat », puisque cette dernière thématique comporte 3 projets exploratoires.



Nombre de projets par département CNRS et établissement public selon le porteur du projet

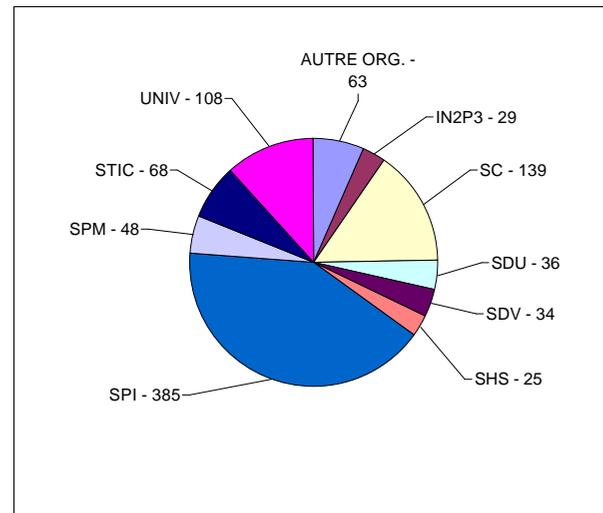
Dans le Programme, plus de 90 % des responsables de projets sont des chercheurs ou enseignants-chercheurs de laboratoires du CNRS ou d'UMR. Pour 5 % des projets (soit 3 projets), il s'agit d'enseignants-chercheurs de laboratoires appartenant à l'Université et pour un seul projet, le responsable appartient à un autre EPST (CEMAGREF). Pour le CNRS, pratiquement tous les départements scientifiques sont représentés. La plus grande proportion des projets concerne le Département des Sciences pour l'Ingénieur, suivi du Département des Sciences Chimiques. Bien qu'une large ouverture ait été faite à la socio-économie lors des appels à projets, la participation du Département des Sciences de l'Homme et de la Société reste modeste. Comme les industriels ne pouvaient être porteurs de projets, leur contribution n'apparaît pas dans ce diagramme. On peut noter d'ailleurs que leur contribution a été assez faible et reste difficile à évaluer. En ce qui concerne les autres établissements publics, bien que non porteurs de projets, leur

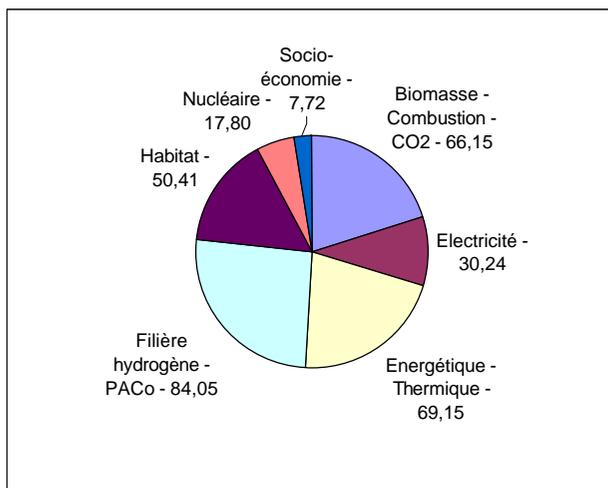
partenariat est apparu dans 18 projets de recherche. Parmi les partenaires impliqués on trouve le CEA (GENEC, Saclay, GRETh), le BRGM, le CSTB, etc.

Le potentiel humain engagé dans le PIE

Le nombre de personnes physiques ayant participé aux projets du PIE s'élève à 935. Il convient d'y ajouter de l'ordre de 120 à 150 personnes ayant contribué aux travaux des GAT, ce qui représente un peu plus de 1000 personnes. La répartition de ces personnes est donnée sur le schéma ci-contre. Le département SPI a mobilisé le plus fort contingent de personnes, avec 385 personnes, soit 41 % du total pour 54 % des projets. Les autres chiffres suivent globalement la répartition des projets.

Répartition du potentiel humain par département CNRS et établissement public selon le porteur du projet

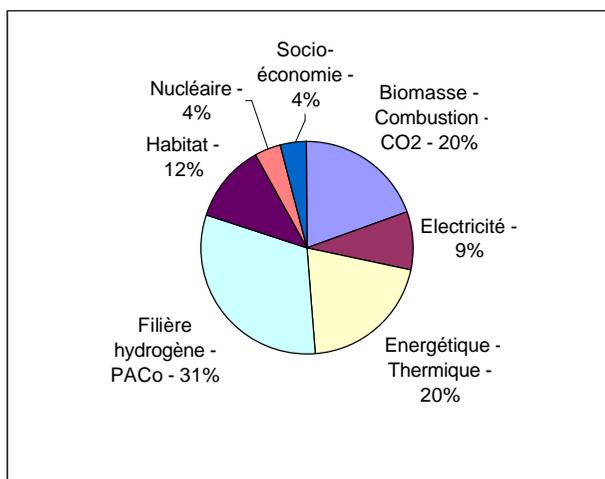




Répartition du potentiel humain par thématique en équivalent temps plein

En terme d'équivalents temps plein (etp), cela correspond pour l'ensemble des projets à 325 etp. L'implication humaine la plus forte concerne la thématique «Hydrogène - Pile à combustible», ce qui est justifié par un plus grand nombre de projets. On peut constater sur le schéma ci-contre que, pour chaque thématique, la contribution en matière d'hommes est approximativement proportionnelle au nombre de projets soutenus. Les quelques écarts peuvent s'expliquer par un nombre de projets exploratoires plus ou moins élevé dans chaque thématique et par la durée des projets de recherche (2 ou 3 ans).

Les moyens financiers consacrés aux projets et aux GAT

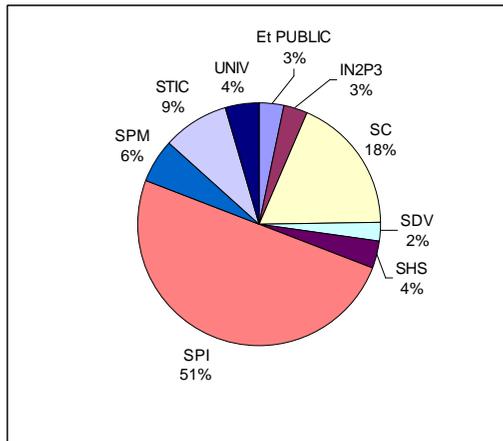


Répartition du budget par thématique

Le Programme a bénéficié d'une dotation financière globale de 8274 k€ HT, en provenance, d'une part, du CNRS, d'autre part, du MENESR et de la DGA. Les dotations du MENESR et de la DGA ont été affectées entièrement à des projets. Pour le CNRS, cela couvre le financement des GAT, de projets de recherche et des projets exploratoires et le fonctionnement de base du Programme.

La part réservée aux projets s'élève à 7699 k€ HT. La répartition thématique, représentée sur le schéma ci-contre montre une prédominance du financement au secteur «hydrogène et pile à combustible», qui est le thème ayant le plus grand nombre de projets et le potentiel humain engagé le plus élevé.

On constate que la répartition financière par thématique suit approximativement l'évolution du potentiel humain. Ainsi, le ratio budget d'un projet/nombre d'heures effectuées sur un projet est sensiblement constant.



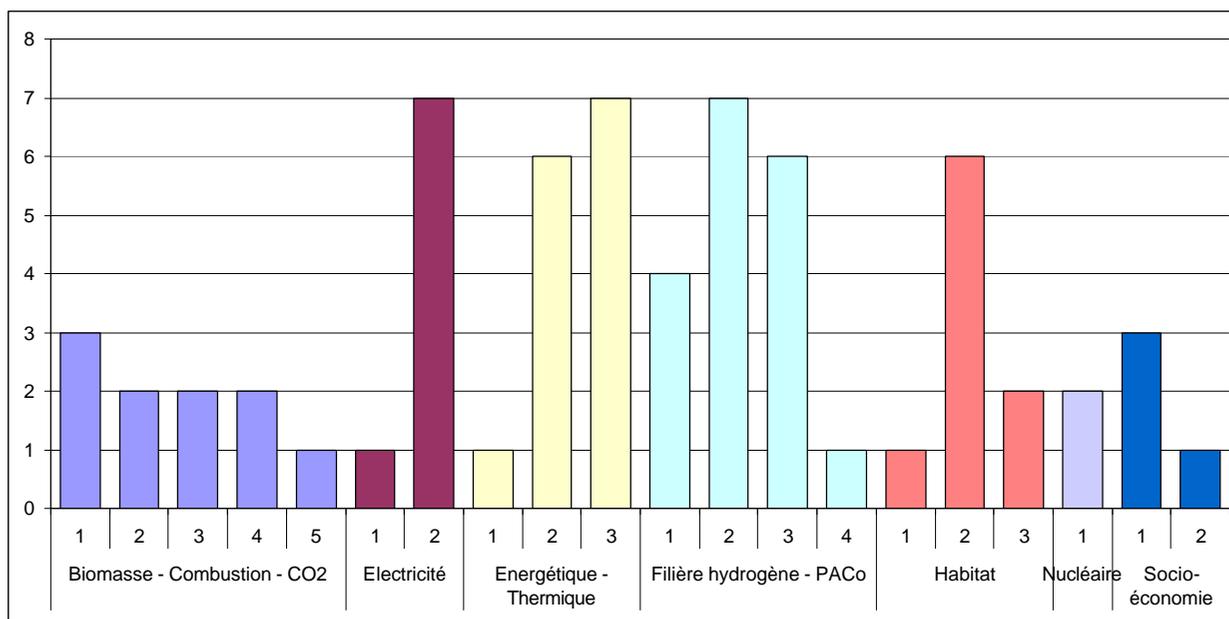
Répartition du budget par département CNRS et établissement public

Les moyens financiers affectés au fonctionnement et à l'animation du Programme atteignent 575 k€, soit près de 7 % du montant du Programme. Une partie de ce budget a été affectée à l'organisation des six colloques : Cargèse (2002), Perpignan (2002), Poitiers (2003), La Hague (2004), Grenoble (2005), Aix-les-Bains (2006) pour un montant total de 146,2 k€. Ainsi, le fonctionnement de base du Programme est de l'ordre de 5 %, ce qui est relativement faible compte tenu du soutien financier des GAT. A ces montants budgétaires, il convient d'ajouter les salaires des personnes impliquées dans le Programme (les moyens affectés à un projet ne couvraient pas de frais de salaires). En tenant compte de la répartition par catégorie de personnels (16 % de directeurs de recherche ou professeurs, 34 % de chargés de recherche et maîtres de conférences, 36 % de doctorants et post-doctorants, 14 % d'ITA, le montant global des salaires atteint 80,8 M€. Le budget consolidé du Programme est donc de 89,3 M€.

L'interdisciplinarité des projets

Un des points forts du Programme Energie a été, de l'avis des participants au Programme, l'interdisciplinarité. Elle s'est tout d'abord concrétisée par les nombreux échanges entre chercheurs de disciplines différentes au cours des colloques. De par la richesse des présentations et leur grande diversité, les colloques ont suscité des collaborations nouvelles entre des communautés généralement éloignées. Cette interdisciplinarité a aussi été très présente au sein des projets comme le montre la figure ci-dessous. Pour chaque thématique, elle donne en abscisse le nombre de départements CNRS ou établissements publics présents sur chaque projet et en ordonnée le nombre de projets correspondants. Par exemple, pour l'électricité, sept projets ont regroupé deux départements, comme le projet "Caphybrid" qui a réuni des équipes appartenant aux départements SC et STIC. Un autre exemple pour la "Filière hydrogène - PACo" est le projet "Stockage du vecteur hydrogène" sur lequel ont travaillé des équipes des départements SPM, SPI et SC. En comptabilisant tous les projets concernés par un seul département ou établissement cela ne représente que 15 projets, soit 23 % du nombre total. Ainsi, plus de 3/4 des projets ont fait l'objet de collaborations entre partenaires d'origines diverses. Cette interdisciplinarité a souvent joué le rôle d'un catalyseur pour le développement de recherches complémentaires, ce qui est un atout pour répondre à d'autres appels à projets, qu'ils soient nationaux ou européens.

Nombre de projets



Nombre de départements CNRS et établissements publics par projet

Interdisciplinarité pour les projets du Programme

La production scientifique

Les différents projets du Programme Energie ont donné lieu à une production scientifique riche et soutenue en terme de publications, de brevets mais aussi en terme de formation de doctorants. Pour les 38 projets de recherche terminés (PR), correspondant aux deux premiers appels à projets, elle correspond à 189 articles de revues, 370 communications dans des congrès et 8 brevets. Ces chiffres sous-estiment grandement les résultats du Programme puisque 18 projets ne sont pas encore terminés et surtout la parution d'articles dans des revues est souvent différée.



Activités scientifiques des projets de recherche



A ce jour, seuls 47 projets de recherche (dont 9 projets exploratoires) sont terminés. La liste de l'ensemble des projets figure en annexe 2. Les rapports d'activités des projets terminés, disponibles sur le site du Programme, sont donnés dans le CD-ROM ci-joint (annexe 3). Seule est présentée ci-dessous une brève analyse des résultats de ces projets.

Filière hydrogène, piles à combustible

Le domaine de l'hydrogène et de la pile à combustible a abordé essentiellement la production et le stockage de l'hydrogène, ainsi que son usage dans le cadre des piles à combustible. Quelques projets complémentaires ont traité de l'usage de l'hydrogène en combustion (combustion assistée par plasma et combustion dans les turbines à gaz). C'est un effort tout particulier qu'a fourni le Programme dans ce domaine, puisque 18 projets ont été soutenus (près de 30 % des projets du Programme).

Deux projets sur 4 traitant de la **production d'hydrogène** sont terminés. Dans le projet «**Production d'hydrogène par des énergies renouvelables**», la problématique de la production d'hydrogène sans dégagement de gaz à effet de serre a été abordée par la voie biologique de deux façons. Deux équipes ont travaillé en forte interaction pour améliorer la production d'hydrogène de certains microorganismes (algues vertes notamment). Les deux autres équipes n'ont pas utilisé d'organismes vivants mais ont eu une approche biomimétique. Elles ont synthétisé et caractérisé des complexes organométalliques bifonctionnels. Si la production d'hydrogène par voie biologique n'est pas une innovation en soi, une avancée intéressante de ce projet est l'identification des causes limitant l'activité des systèmes. Du fait d'une approche globale pluridisciplinaire, le domaine couvert, qui va du génie génétique au génie chimique en passant par la chimie, est très vaste.

Le projet «**HYSOL**» concerne la production d'hydrogène par reformage non catalytique d'hydrocarbures dans un réacteur solaire. Trois voies ont été abordées :

- ▶ la cosynthèse d'hydrogène et de nanomatériaux carbonés sans production de CO₂ à partir du craquage du méthane à haute température dans un four solaire ou dans un four à images ;
- ▶ la simulation du reformage thermique du propane dans un réacteur solaire montre la possibilité de production d'un gaz avec 70 % de H₂ à 1700 K ;
- ▶ la construction d'une base de données de 280 cycles thermochimiques de production de H₂ par décomposition de l'eau et le développement d'une méthodologie de comparaison des cycles par analyse exergetique.

Pour un rayonnement solaire de 2200 kWh/m².an, la productivité de chaque procédé est estimée respectivement à : 1100 Nm³ H₂/m².an, 800 Nm³ H₂/m².an et 140 Nm³ H₂/m².an.

Le **stockage du vecteur hydrogène**, étape fondamentale pour son développement au niveau des réservoirs transportables, a conduit à la mise en place de 7 projets, dont 1 n'est pas terminé.

Le premier projet avait pour objectif l'étude de «**Matériaux pour le stockage de l'hydrogène**». Ainsi, des recherches ont été engagées sur deux sujets : les matériaux à base de nanotubes de carbone pour un stockage par adsorption à haute pression et les matériaux à base d'hydrures métalliques pour un stockage par absorption à basse pression. Les résultats exprimés en capacités massiques de stockage se révèlent décevants pour l'adsorption à haute pression (1 à 2 % en poids à 20 bar) et, dans tous les cas, bien inférieurs aux normes du Department of Energy (DOE - USA).

Un second projet sur le «**Stockage dans des hydrures métalliques légers**» a permis la mise au point de nouveaux composés intermétalliques (à base de magnésium) pour le stockage de H₂ dans des conditions proches de l'ambiante. Des améliorations concernant la cinétique du magnésium activé et celle du transfert d'hydrogène en utilisant des liants graphitiques ont été obtenues. Des études fondamentales sur les propriétés thermodynamiques des hydrures et sur les calculs de structure électronique ont été réalisées. Des cinétiques d'hydrogénation à grande vitesse ont été obtenues dans le système Mg-métal, mais néanmoins des températures supérieures à 200 °C sont toujours nécessaires pour désorber l'hydrure. La faisabilité de composites Mg-GNE (Graphite Naturel Expandé) pour l'amélioration de la conductivité thermique a été démontrée. Bien que la capacité massique reste faible, cette voie apparaît prometteuse pour la mise en forme des hydrures métalliques dans des réservoirs.

Le projet «**Stockage d'hydrogène dans les matériaux nanostructurés**» n'a pas conduit à des avancées spectaculaires en matière d'amélioration des capacités adsorbantes des matériaux carbonés à microporosité contrôlée adaptée au stockage de H₂ (1,5 % à température ambiante) ; cette capacité augmente à 3 % par dopage avec le lithium. Par ailleurs, il est apparu que le piégeage de H₂ par voie électrochimique pourrait avoir un intérêt dans l'utilisation de ces matériaux nanoporeux comme électrode négative de batteries en milieu aqueux.

Dans le projet «**Stockage de l'hydrogène dans les nanostructures carbonées**», plusieurs nanostructures carbonées ont été réalisées par différentes techniques (CVD, arc électrique et four solaire). Les capacités de stockage restent faibles et il ne ressort pas d'effet significatif de la structure ou de l'orientation des fibres sur ces capacités. Les nanotubes semblent les moins performants. Les conclusions des auteurs sont claires : «les capacités de stockage d'hydrogène mesurées et calculées à température ambiante et pression modérée sont très inférieures aux valeurs seuils permettant de proposer les nanostructures carbonées comme matériaux candidats pour des applications automobiles».

Le projet «**Solution hybride de stockage d'hydrogène**» avait pour objectif la validation/infirmité du concept de réservoir hybride pour un stockage sécurisé de l'hydrogène. La solution hybride retenue consiste à associer dans un même réservoir une enveloppe de cœur sous pression pour contenir l'hydrogène et une enveloppe externe emprisonnant un intermétallique ayant pour fonctions, d'une part, la capture de l'hydrogène par gonflement, en cas de fuites de l'enveloppe de cœur, d'autre part, de permettre la fermeture de la fissure éventuelle. Des recherches d'intermétalliques en rubans ont

permis d'identifier des alliages ZrFe pour jouer le rôle de barrière active au franchissement de l'hydrogène. Bien qu'un tel réservoir de stockage n'ait pu être réalisé, ce projet a permis d'optimiser la conception du réservoir interne, de simuler numériquement l'«autoréparation» d'un réservoir tricouche, d'identifier et caractériser l'intermétallique retenu et enfin, de modéliser l'hydruration à travers une structure tricouche.

Le projet «**H2-THERM**» concerne la modélisation du comportement de réservoirs de stockage d'hydrogène par lit fixe adsorbant d'une part, du point de vue de la thermomécanique lors du remplissage fortement exothermique du réservoir, d'autre part, de la thermomécanique de l'enveloppe du réservoir. Les matériaux considérés ont des capacités d'adsorption massiques de 6 % compatibles avec les recommandations du DOE américain. Certains verrous liés au problème de la gestion de la thermique lors du remplissage des réservoirs ont été identifiés. Ils concernent l'échauffement généré au cours du remplissage avec des élévations de température de 200 à 300 K et la perte de capacité (25 %) qui en résulte, la nature des matériaux d'enveloppe du réservoir et la surface d'échange nécessaire pour avoir un remplissage isotherme. Pour lever ces verrous, il est envisagé d'optimiser le garnissage et la configuration géométrique de l'alimentation du réservoir pour minimiser l'élévation de température, et de travailler sur l'élaboration de matériaux combinant une bonne capacité d'adsorption (forte porosité) et une conductivité thermique élevée.

Sur les 7 projets consacrés aux **piles à combustible** , seul le projet «**Cœur de pile à combustible à électrolyte à membrane**» est terminé. Des progrès ont été réalisés dans trois grandes directions :

- ▶ amélioration des électrodes, de leur fonctionnement et de leur fabrication : forte diminution (d'un facteur 5 à 10) de la quantité (donc du coût) des catalyseurs d'électrodes à base de métaux platinoïdes ;
- ▶ diminution de l'épaisseur des membranes polymères : perspectives intéressantes de la méthode de dépôt sous vide (CVD - Plasma) qui permet de réduire l'épaisseur de la membrane (facteur 10 environ), donc la taille finale (5 à 10 μm au lieu de 100 à 200 μm), ce qui réduit fortement la résistance spécifique de la cellule élémentaire ;
- ▶ amélioration globale du fonctionnement du cœur de pile : développement de modèles de simulation (processus de transport gaz, eau), mais la validation à partir de petits éléments n'a pas été effectuée. L'innovation réside dans la mise au point de nouvelles cathodes et méthodes de fabrication des membranes.

Bâtiment

Dans le domaine de l'**habitat**, ou plus généralement du **bâtiment**, mis à part 1 projet relevant plus particulièrement des enveloppes, les 8 autres projets (5 PR et 3 PE) ont été consacrés au domaine de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) et à son intégration dans le bâti. Seuls 6 projets dans le domaine du photovoltaïque sont terminés à ce jour.

L'objectif du premier projet de recherche, intitulé «**Recherche de base en photovoltaïque**» concerne deux filières de matériaux photovoltaïques en couches minces : la filière Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) et la

filière organique. Si la première de ces filières est bien connue dans son principe, la structure en est complexe, avec la présence de plusieurs interfaces : ZnO / CdS / CIGS. Des progrès significatifs ont été obtenus quant à la maîtrise de l'interface ; un rendement de 16 %, proche des meilleurs standards européens, a été atteint avec des traitements chimiques à base de brome et de KCN. Différentes voies de recherche ont été explorées pour les dispositifs à base de molécules organiques et polymères et pour leur structure. Un premier groupe d'études a montré l'intérêt de l'utilisation du fullerène C₆₀ comme accepteur et conducteur d'électrons, greffé d'une molécule organique ou associé à des polymères donneurs d'électrons, en structures bicouches ou dans des réseaux interpénétrés. Une autre voie d'approche originale est celle des structures à base d'empilements discotiques, qui vise à augmenter la conductivité des polymères. Des essais concluants sur l'utilisation de CuPc dans les structures bicouches ont été obtenus. Les filières organiques constituent un challenge scientifique considérable dont l'horizon d'applications industrielles se situe à long terme.

L'objectif du projet exploratoire «**Cellules photovoltaïques basées sur des polymères oxygénés du titane**» concerne l'utilisation de nouveaux polymères oxygénés du titane pour élaborer des films minces photo-actifs. Ainsi, de nouvelles cellules ont été réalisées à partir d'un gel de titane photosensible, qui possède des propriétés optiques intéressantes ; transparent en l'absence d'illumination, il prend une coloration bleu-nuit intense, par suite de la réduction de Ti⁴⁺ en Ti³⁺, après exposition à la lumière du jour. Cette particularité permet d'envisager la réalisation de cellules solaires exemptes de photosensibilisateur et en raison de la réversibilité du phénomène, le développement de photobatteries. La compréhension du processus de polymérisation, l'étude structurale du gel et des processus photoactifs intervenant lors de l'irradiation UV ont été réalisées. La mise en évidence d'une auto sensibilisation laisse entrevoir des perspectives intéressantes.

Le projet exploratoire «**Effet photovoltaïque dans un photoplasma solaire**» traite de la faisabilité de la conversion photovoltaïque du rayonnement solaire concentré par photo-ionisation d'un milieu gazeux composé de vapeurs métalliques. Sur le plan physique, cette voie nécessite une grande absorption du rayonnement solaire, la production de charges électriques par ionisation suite à l'absorption, la création d'une différence de potentiel entre les charges. C'est la molécule de césium qui a été retenue pour cette étude, pour laquelle plusieurs mécanismes de photoionisation peuvent conduire à la formation d'électrons primaires. Une nouvelle voie de conversion photovoltaïque est ainsi démontrée avec un rendement, calculé par un modèle 1D, significatif (10 à 30 %). Les espoirs sont subordonnés à des essais sur une cellule test et à un bilan énergétique complet.

Le but du projet exploratoire «**Silicium solaire**» est la mise au point et le développement d'un procédé de Physical Vapor Deposition pour la réalisation de couches minces amorphes ou polycristallisées de Si. La première étape du projet concerne le contrôle du procédé : la température de la surface fondue d'une plaque de silicium dans le processus de dépôt par évaporation n'a été réalisée qu'indirectement par mesure de la température du solide par pyrométrie infra-rouge (l'émissivité du liquide ayant trop de fluctuations) et estimation de la température par modélisation thermique. Cela a permis une modélisation du processus de dépôt. La seconde étape est relative à la caractérisation physico-chimique et morphologique des couches minces. L'épaisseur limite des couches déposées sur substrat

froid est de 150 à 200 nm. Pour statuer sur l'intérêt de ce procédé, il reste à tester la qualité électronique du matériau. Le dépôt sur substrat chaud devrait donner en principe de bons rendements en terme de qualité photovoltaïque.

Dans le projet de recherche «**Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques au bâti**», deux voies d'intégration de capteurs solaires hybrides ont été retenues : capteurs air/photovoltaïque (électricité + préchauffage air des locaux) et capteurs eau/photovoltaïque (électricité + chauffage et eau chaude sanitaire). Le projet a été organisé en quatre actions :

- ▶ Etude des mécanismes physiques grâce au développement de modèles prédictifs fins : couplage d'un modèle innovant de rayonnement en milieux semi-transparents et conduction, avec un modèle de convection naturelle ; cette étude reste à conforter d'une part, par une étude expérimentale pour identifier les propriétés thermo-optiques des matériaux, d'autre part, par la prise en compte de la conversion électrique.
- ▶ Intégration au bâti des composants hybrides : développement de modèles simples de capteurs hybrides, couplés à un modèle de bâtiment, pour optimiser les productions en fonction des besoins. Des écarts significatifs subsistent entre les modèles simples et fins. Aucun résultat chiffré du modèle global n'est présenté pour le capteur hybride à air. Pour le capteur à eau, l'intérêt de l'hybridation n'est pas évident pour les configurations étudiées.
- ▶ Conversion électrique : les modèles existants ont été développés, puis comparés à des valeurs expérimentales obtenues antérieurement.
- ▶ Etude socio-économique : cette étude ne concerne que les cellules PV.

Les nombreux résultats de ces modélisations sur l'hybridation des capteurs intégrés au bâtiment nécessiteront des validations avant qu'un transfert vers le secteur aval ne soit possible.

Biomasse, combustion et CO₂

Ce domaine a fait l'objet de 10 projets, répartis également entre les trois domaines. Sur les 3 trois projets relatifs à la biomasse, 1 n'est pas encore achevé. En ce qui concerne le CO₂, la communauté scientifique ne s'est réellement mobilisée sur ce sujet qu'au cours du troisième appel à projets ; ainsi, 1 seul projet est terminé sur les 3 de ce domaine. Pour la combustion, 1 projet sur les 4 est encore en cours.

Le projet de recherche «**Biocarburant éthanol**» s'intéresse à l'approche biologique en prenant en compte tout l'itinéraire technologique allant de la ressource végétale jusqu'au biocarburant. Il a mobilisé neuf équipes, fortement interdisciplinaires, sur différentes actions relativement indépendantes mais complémentaires. Il comprend tout d'abord l'identification et la production de systèmes enzymatiques de dégradation de la matière végétale, adaptables au type de lignocellulose à liquéfier. La vitesse d'hydrolyse peut être accrue d'un facteur 3 à 4. La possibilité de fermentation directe de cellulose en éthanol a été établie. Une meilleure connaissance et une meilleure maîtrise du microorganisme ont été acquises pour identifier, dans des conditions extrêmes de concentration en éthanol, les gènes impliqués dans les inhibitions et la résistance, les étapes intracellulaires limitantes

et les comportements physiologiques macroscopiques. Ces résultats devraient permettre d'obtenir une levure adaptée aux exigences industrielles. Dans une autre action, avec un bioréacteur biétagé, les conditions optimales de production d'éthanol ont été dégagées, permettant d'atteindre des rendements et productivités parmi les plus performants de la littérature. Enfin, un procédé d'extraction de l'éthanol par des membranes modifiées à partir de l'effluent d'un fermenteur biologique a été étudié. Ce projet, associant des équipes compétentes en génétique, enzymologie, physiologie, chimie, automatique et génie des procédés, devrait permettre d'aboutir à un procédé de production de biéthanol carburant performant et fiable.

L'objectif du projet exploratoire «**Biomasse, combustion, gazéification**» est de définir, à partir d'une étude bibliographique et de contacts avec la communauté des chercheurs et industriels, une politique de recherche à court, moyen et long terme, en matière de procédés thermo-chimiques de pyrolyse-gazéification de la biomasse ou de déchets, pouvant être couplés à une application de génération directe d'énergie ou de production de biocarburants ou biocombustibles. Deux colloques (Poitiers et Nancy) d'environ trente personnes avec une douzaine d'industriels ont permis de rassembler la communauté concernée. Les premiers projets biocarburant du Programme (dont le projet précédent) devraient permettre d'atteindre l'objectif fixé par l'Union européenne. Pour aller au-delà il faudra mettre en œuvre de nouveaux procédés à partir de matière première ligno-cellulosique. La préparation de l'hydrogène par pyrolyse gazéification de la biomasse nécessitera des recherches amont importantes pour le moyen terme.

Un seul projet intitulé «**Capture par adsorption de CO₂ dans des gaz de centrales thermiques et leur injection en puits de pétrole**», qui a rassemblé des équipes de 6 laboratoires, traite du domaine du CO₂. L'objectif visé est l'étude complète d'une chaîne de capture du CO₂ par adsorption (centrales thermiques classiques ou à gazéification et cycles combinés) et séquestration du CO₂ par injection du gaz dans un puits de pétrole dans un but de récupération assistée de celui-ci. Les principaux résultats pour chaque phase de l'étude sont les suivants :

- ▶ sur le plan du stockage, les capacités de stockage en aquifères profonds ne semblent pas limitantes mais il sera nécessaire de prendre en compte des fuites éventuelles du point de vue gestion des stocks,
- ▶ récupération : la maîtrise des mécanismes de miscibilité pour la récupération assistée du pétrole montre que le CO₂ est un gaz prometteur bien que le rendement soit difficilement prédictible,
- ▶ capture : pour les centrales thermiques à gazéification et cycles combinés (IGCC), la capture du CO₂ par un procédé d'adsorption modulé en pression travaillant selon un cycle simple est techniquement envisageable. Le combustible destiné à la turbine à combustion étant essentiellement de l'hydrogène, avec un peu de CO, l'hydrogène peut être produit à la pression d'utilisation avec un rendement proche de 100 %. Le compromis concernant le taux de récupération du CO reste à étudier et nécessite une modélisation très fine de la co-adsorption CO₂/CO/N₂/H₂O. Pour les adsorbants, des charbons actifs commerciaux sont de bons candidats pour ce procédé d'adsorption, en raison à la fois de leur robustesse chimique, de leur versatilité, de leur capacité opératoire et de leur faible coût. Cependant, d'autres matériaux ont été proposés (zéolites à forte capacité, charbons améliorés, incorporation d'un matériau à changement de phase) avec une

augmentation escomptée de la capacité intrinsèque de l'adsorbant du CO₂ de l'ordre de 30 % par rapport au matériau commercial.

Sur les quatre projets traitant de la **combustion**, 3 projets de recherche sont terminés, ils portaient tous, à des degrés divers, sur des procédés innovants : flexibilité aux combustibles, amélioration de la combustion par l'intermédiaire d'un plasma qui ensemece les gaz combustibles en radicaux, et usage de combustibles issus de la biomasse dans les moteurs du type HCCI (Homogeneous Charge Compressed Ignition).

Dans le projet «**Combustion propre dans les foyers à cycles combinés et flexibles aux nouveaux combustibles**», l'objectif est de comprendre les mécanismes physico-chimiques impliqués dans le régime de Combustion Sans Flamme (CSF). Pour cela, quatre dispositifs nouveaux ont été conçus : trois dispositifs académiques (brûleurs modèles) et un pilote semi-industriel. Une étude théorique a permis de développer un modèle adapté de combustion turbulente et une étude numérique a conduit à affiner les hypothèses concernant les mécanismes d'auto-inflammation. La CSF, identifiée initialement en milieu industriel, a été caractérisée en laboratoire. Par dilution des réactifs dans les gaz brûlés, on observe que le front s'élargit et s'étend sur tout un volume. La densité de flux volumique et la température diminuant, il se forme moins de NO_x et l'absence de front induit moins de variations de masse volumique, de pression et donc de bruit. Par ailleurs, la température diminuant, la flamme n'émet plus dans le visible. Pour illustrer quelques résultats significatifs, indiquons que l'on a pu réduire nettement les émissions de NO_x (facteur 10), ainsi que le taux de suies produites et les imbrûlés. Les développements de modélisation et d'expérimentations ont permis de progresser dans la compréhension des cinétiques, de l'auto-inflammation et des transferts (moins de rayonnement et rôle accru de la convection et de la conduction). Les perspectives se situent dans le domaine de la métrologie des flux, dans l'ouverture, maintenant envisageable, à d'autres combustibles et dans une application possible aux turbines à gaz.

Pour le projet «**Combustibles issus de la gazéification de la biomasse dans les moteurs HCCI**», il a été démontré, en s'appuyant sur des modélisations cinétiques, l'effet activateur du monoxyde d'azote (NO) sur la cinétique d'oxydation du méthane, utilisé pour représenter un biogaz purifié, du gaz de synthèse, du méthanol et du diméthyléther. Une seconde partie, portant sur une configuration représentative des conditions expérimentales présentes dans un moteur HCCI, a permis de valider les modèles cinétiques d'auto-inflammation des mélanges combustibles homogènes. Un banc a été conçu de façon à maîtriser les conditions thermodynamiques régnant dans le cylindre en fin de compression. Des premiers essais ont démontré la capacité du banc à permettre l'observation des différents régimes de combustion et, fait important, le régime de flamme froide, sans auto-inflammation du mélange, a été obtenu de façon stable. Pour chaque essai, les conditions d'apparition de la flamme froide, de l'auto-inflammation et du cliquetis ont été étudiées. L'étude de la phénoménologie de l'auto-inflammation par compression rapide du diméthyléther en milieu pauvre et stœchiométrique (600-900 K) dans des conditions analogues au fonctionnement des moteurs HCCI a enfin été menée avec mise en évidence de flammes froides, d'auto-inflammation multizones et d'une réactivité exceptionnellement élevée pour une molécule légère. L'effet promoteur du dioxyde d'azote sur les délais d'auto-

inflammation a également été mis en évidence. L'ensemble a permis l'établissement d'une base de données.

L'objectif du projet «**Combustion assistée par H₂ et radicaux générés par un plasma non thermique**» est l'étude de la possibilité d'enrichir un mélange méthane-air en hydrogène et radicaux par un procédé plasma et d'évaluer la faisabilité de cette technique par des essais sur banc moteur. Le procédé testé dans ce projet est plus performant que les autres procédés plasmas froids pour produire de l'hydrogène dans des conditions de mélange qui sont loin d'être optimales pour reformer le méthane : contraintes imposées par l'application choisie. Il a été montré expérimentalement que, pour des mélanges air/méthane (16 % à 30 % de CH₄), il est possible de produire un mélange combustible comprenant entre 12 % et 5 % d'hydrogène, de l'ordre de 10 % de CO et moins de 5 % de CO₂. Cependant, les essais moteur montrent que les quantités d'hydrogène produites par ce procédé restent insuffisantes pour améliorer la combustion moteur, avec une augmentation des NO_x et CO à l'échappement. Les résultats de la modélisation des cinétiques d'oxydation du mélange méthane-oxygène sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. On obtient une activation significative de l'oxydation du méthane au-delà de 5 % de H₂ dans le mélange combustible. Compte tenu des premiers résultats, il semble possible d'affirmer que l'adjonction d'un dispositif plasma favorise l'initiation de la combustion et l'amélioration du procédé pourrait permettre son utilisation pour des moteurs fonctionnant au gaz naturel.

Energétique, thermique

En partant du constat que l'énergie réellement utile ne représente qu'environ 45 % de l'énergie primaire consommée en France, l'un des enjeux majeurs du futur est l'amélioration de l'efficacité énergétique des processus et des procédés de conversion des énergies, de leur transport et de leur stockage. Or, la thermique intervient dans tous les procédés de conversion d'énergie et elle est présente également, sous forme de chaleur ou de froid, en tant que vecteur énergétique qui peut et doit être stocké. Le domaine de la thermique-énergétique est donc très vaste et les systèmes impliqués sont très diversifiés. Ainsi, 15 projets soutenus par le Programme et traitant de divers aspects de ce domaine ont été répartis en six thématiques. Ils représentent un peu plus de 20 % du nombre total des projets.

Les deux premiers projets concernant la **thermodynamique** sont étroitement liés. L'objectif du premier projet «**Communauté d'analyse et de recherche des nouvelles orientations de la thermodynamique - CARNOT**» est avant tout la structuration d'une communauté française de thermodynamique devant faire l'état des lieux des outils et des concepts actuels dans ce domaine (une dizaine d'équipes). Du fait de son caractère spécifique, il a été maintenu sur toute la durée du Programme. Les différentes contributions tant scientifiques que pédagogiques relevant de la thermodynamique souffrent souvent d'une incompréhension due à une multitude d'outils, de langages et de conventions. L'un des premiers objectifs a donc été d'uniformiser les différentes approches, telles que l'analyse entropique ou exergétique, la thermodynamique en temps fini, la thermodynamique des processus irréversibles, ou d'identifier les champs d'applications privilégiés de chaque méthodologie.

Les champs d'applications sont tout d'abord l'analyse des cycles et plus généralement des machines thermodynamiques :

- ▶ soit pour l'optimisation et le contrôle optimal des systèmes existants,
- ▶ soit pour l'expertise des projets émergents,
- ▶ soit, enfin, pour la définition de nouveaux concepts d'utilisation de l'énergie, tant pour sa production ou transformation (froid, chaleur, travail) que pour la transformation de la matière (génie chimique). Pour ce faire, trois séminaires (organisés à Gourette, Fontainebleau, Aussois), auxquels ont participé une trentaine de personnes, ont permis des réflexions et des échanges sur différents thèmes de thermodynamique contemporaine. Trois écoles thématiques sur la thermodynamique, ouvertes aux jeunes chercheurs, ont couvert les domaines suivants :

Ecole CARNOT I : «Application des méthodes entropiques et exergétiques aux systèmes énergétiques».

Ecole CARNOT II à Nancy : «Méthodes de thermodynamique avancée ; application aux systèmes et procédés énergétiques».

Ecole CARNOT III à Pau : «Théorie constructale et applications, optimisation de systèmes et procédés, thermoéconomie».

Une journée thématique a été organisée en relation avec la Société Française de Thermique sur : «Géométries multiéchelles, théorie constructale et exergie». La dynamique créée grâce à ce projet devrait se poursuivre par d'autres séminaires et écoles thématiques qui constituent des temps forts pour la communauté «thermodynamicienne».

Le second projet «**Méthodes exergo-économiques pour diminuer les coûts d'investissement et de fonctionnement de systèmes énergétiques**» porte sur l'interfaçage de méthodes purement thermodynamiques d'optimisation des performances techniques avec des méthodes d'optimisation économique de systèmes énergétiques complexes. En appui aux travaux effectués dans le projet CARNOT, il a permis de constituer un réseau de compétences partagées permettant la diffusion et l'enseignement des méthodes. Sur le plan théorique, la mise en évidence de l'équivalence des différentes méthodes et formalismes de mise en œuvre de la thermoéconomie apparaît comme un résultat très intéressant et inédit. Il ouvre la voie à une recherche de mise en œuvre de ces méthodes qui soit la plus simple et la plus efficace possible. Des applications à des cas types pour tester ces méthodes ont été réalisées. Pour l'instant la démarche a surtout traité des régimes permanents, mais devant l'importance des phénomènes dynamiques, les régimes variables, les transitoires, etc. devraient être abordés dans le futur.

Les **échangeurs** ont fait l'objet de 4 projets. Ce sont des composants omniprésents dans de nombreux processus, en particulier dans les systèmes de conversion énergétique. Ils mettent en jeu souvent des quantités d'énergie très importantes. Ce composant est particulièrement sensible en matière d'efficacité énergétique.

Le projet «**Microéchangeurs**» a permis de clarifier un certain nombre de points relatifs aux écoulements et aux transferts dans des configurations géométriques représentatives des micro-échangeurs, en terme de validité des lois ou critères usuels (pertes de charge, coefficient d'échange,

etc.) en fluide mono- ou di-phasique. Différents moyens de mesures ont été testés. Pour les écoulements monophasiques en conduites lisses et avec des fluides standards, les études montrent la validité des corrélations classiques jusqu'à des tailles de l'ordre de 5 μm , la modification de la loi de frottement en présence d'effets de double couche électrique, l'importance du couplage thermique avec les parois. Par contre l'effet des rugosités reste à clarifier. Les conditions d'entrée semblent très critiques sur la nature des écoulements. Dans les études d'ébullition en convection naturelle, un effet très marqué du confinement est mis en évidence avec la présence d'un optimum pour l'intensification des échanges thermiques. En ébullition convective, certains mécanismes de déstabilisation ont été identifiés. Les investigations expérimentales montrent la nécessité de capteurs très localisés. Des micro-échangeurs en polymère et microstructurés extrudés ont été réalisés et ont donné lieu à dépôt de brevet.

Le projet «**Echangeurs multifonctionnels**» vise à lever le verrou technologique posé par le passage en continu de procédés industriels mettant en œuvre des réactions chimiques fortement exothermiques et sujettes à emballement, ce qui permettrait une réduction des coûts énergétiques et une amélioration de la sécurité. Il propose également d'évaluer les gains énergétiques, économiques et environnementaux associés à la mise en œuvre de tels procédés. Dans ce projet, il a été démontré que les phénomènes de micromélange, étroitement liés aux conditions d'écoulement et aux caractéristiques de transport des réactants, prévalent sur les phénomènes de macromélange, plus faciles à appréhender au moyen de modèles classiques. La validation de modèles existants des phénomènes de micromélange a été réalisée sur des données de la littérature. La mise en œuvre de la LIF (Laser Induced Fluorescence : mesure simultanée des concentrations et températures au sein du réacteur) devrait permettre de faire progresser les connaissances concernant les relations structure / propriétés des écoulements, notamment aux échelles microscopiques. Différentes configurations d'échangeurs ont été étudiées : un compromis entre une bonne capacité à évacuer la chaleur de réaction (avantage aux ailettes OSF (Offset Strip Fins)) et une bonne «qualité» du mélange (avantage aux échangeurs chaotiques) doit être recherché. L'utilisation de mousses métalliques semble particulièrement intéressante, en particulier si les réactions mises en jeu sont du type catalytique.

Dans le contexte sidérurgique du laminage à chaud, les caractéristiques des aciers obtenus dépendent fortement des conditions de refroidissement. Dans ce contexte, l'objectif du projet «**Refroidissement diphasique**» est le contrôle de la cinétique du refroidissement par eau de tôles d'acier lors du laminage pour leur conférer des propriétés mécaniques homogènes et, in fine, diminuer leur épaisseur. Ce projet a permis de développer des outils de mesure et de prédiction des phénomènes de transfert dans le refroidissement diphasique par jet impactant. Un dispositif expérimental, associé à une instrumentation fine pour l'analyse locale des transferts de chaleur dans le cas de l'ébullition convective, a été développé. Il a permis de tester la validité de la simulation numérique dans une géométrie complexe. Les résultats obtenus ont permis de proposer des lois de prédiction dans les conditions réelles. La mise en œuvre des différentes compétences en relation avec une problématique industrielle bien identifiée fait toute la qualité de ce projet.

Le projet «**Répartiteurs de chaleur diphasiques associés aux PEMFC**» concerne l'étude de systèmes diphasiques pour transférer de la chaleur avec un faible gradient de températures. L'application est le refroidissement de piles à combustible PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). L'étude a permis de juger de la validité d'une approche diphasique afin de contrôler thermiquement le cœur de PEMFC de grandes dimensions. Les technologies de répartiteurs en cuivre du type rainuré, à privilégier pour cette application, permettent une bonne uniformisation de la température du cœur de piles (écarts < 1 K). Le développement de structures en silicium est intéressant car il permet la miniaturisation avec une épaisseur du système inférieure au millimètre. Un important travail de modélisation a par ailleurs été réalisé ; il concerne, d'une part, la modélisation du cœur de la pile, d'autre part, la modélisation du «spreader». Il permet de prédire le comportement thermique du système diphasique pour les conditions aux limites fixées par le fonctionnement de la pile. Par ailleurs, il est très utile pour optimiser la géométrie interne du spreader afin d'atteindre les performances souhaitées.

De nos jours la plupart des machines thermiques sont dimensionnées pour un fonctionnement en régime permanent. Il en découle que, pour «passer» les transitoires, ils doivent être surdimensionnés. C'est pourquoi une meilleure connaissance de ces régimes transitoires (phase de démarrage, variation de régime, etc.) est nécessaire. C'est l'objectif du projet «**Comportement en régime variable de machines thermiques à cycle inverse**» qui concerne l'établissement de modèles transitoires des composants de machines frigorifiques. Le but ultime est, après réduction et validation des modèles, de les intégrer dans les logiciels de contrôle/commande, tout en utilisant des algorithmes robustes. Différentes avancées ont été accomplies : validation des programmes de simulation des transitoires rapides, notamment pour les machines à compression de vapeur, adaptation de logiciels existants à la problématique des transitoires glissants. De plus, il a été montré la possibilité de réduction de modèles permettant de passer de 25 à 6 le nombre d'informations nécessaires pour caractériser une machine. La méthode a montré son intérêt en cas de défaillance ou d'absence d'informations, pour reconstruire valablement celles-ci.

Le stockage d'énergie à haute température est un moyen pour la récupération de rejets thermiques à des températures de l'ordre de 200 à 600 °C dans l'industrie ; le potentiel d'économies est très grand. Cependant, il se heurte à un problème économique en matière de coûts d'investissement. L'objectif du projet «**Matériaux composites pour le stockage à haute température**» est l'élaboration de composites graphite-MCP (Matériaux à Changement de Phase) pour le stockage thermique, la caractérisation de ses propriétés thermo-physiques et l'analyse de la cinétique de cristallisation et des phénomènes de transfert des composants. Le caractère innovant du projet réside dans l'intégration de MCP dans des matrices de graphite. Six sels, avec des températures de fusion comprises entre 200 et 550 °C, ont été retenus, en s'appuyant sur des mesures de conductivités thermique et électrique. Sur les trois voies d'élaboration étudiées, la meilleure méthode de conditionnement consiste à disperser des particules de graphite dans du sel fondu. Le graphite peut modifier les équilibres et les dynamiques de fusion/cristallisation du sel, ce qui se traduit par un effet stabilisant avantageux et/ou un effet anti-surfusion de la matrice sur le comportement du composite.

L'étude de la production d'énergie frigorifique à partir d'énergie renouvelable a été abordée dans le projet «**Froid solaire**». Le système proposé est la **production de froid** à partir d'une source solaire basse température, dont l'intérêt est évident pour les pays à fort ensoleillement. Une analyse théorique de la sorption solide-gaz montre sa bonne adaptation au cycle jour/nuit de production de froid solaire. Les résultats d'un code de calcul ont permis de quantifier la part du radiatif et du convectif dans les échanges et de concevoir ainsi un système optimisé dans le couplage écoulement/transfert. Le principal résultat se trouve dans la mise au point d'un système thermochimique fonctionnant en cascade, bien adapté à la production du froid (- 30 °C) avec une source basse température (70 °C). La modélisation du système en cascade montre qu'il devrait être optimisé au sens du nombre d'étages, et les aspects encrassement, corrosion, maintenance devront être approfondis pour soutenir l'intérêt du système dans le cadre d'une utilisation industrielle.

Les projets suivants traitent de dispositifs de transport et de distribution de l'énergie thermique aussi bien pour le domaine de l'habitat que pour celui de la conservation des produits alimentaires. Le projet «**Réseaux de distribution du froid par fluide frigoporteur diphasique**» concerne la faisabilité de «coulis stabilisés» comportant un fluide frigoporteur chargé en particules à changement de phase formé d'un gel et d'un MCP, comme alternative aux coulis de glace classiques. Les différents aspects abordés dans ce projet sont : synthèse et caractérisation des coulis de glace, instrumentation associée, propriétés de transport à l'échelle locale et globale, caractérisation in situ des fractions solides, mise en oeuvre dans une boucle frigorifique de différents composés. Des résultats significatifs quant aux propriétés de transport et d'échange thermique ont été obtenus et la méthode de mesure de composition par absorption infra-rouge a été validée. Cependant, le rapport révèle clairement le besoin d'étudier la rhéologie de tels coulis. La dimension applicative est le point fort du projet.

Le projet «**Coulis d'hydrates**» a pour objectif la mise sur le marché de nouveaux frigoporteurs diphasiques. Dans une installation de distribution de froid ou de climatisation, la formation de ce composé a lieu dans l'évaporateur et sa dissociation dans les échangeurs utilisateurs du froid. L'étude développée, qui se situe bien en amont de cet objectif, concerne l'analyse fondamentale de la réalisation et de la connaissance thermodynamique de ce type de produit tant sur le plan expérimental que sur celui de la modélisation. Il s'agit d'un coulis d'hydrates composé d'eau en tant que support et de particules solides d'hydrates de CO₂. La chaleur de formation ou de dissociation de l'hydrate est environ deux fois plus grande que la chaleur latente de fusion de l'eau, ce qui rend ce procédé extrêmement intéressant. Pour les deux types de produits réalisés (CO₂-eau et CO₂-eau-THF), la courbe d'équilibre et l'enthalpie de formation ont été déterminées expérimentalement par deux méthodes. Ces essais ont permis de valider le modèle thermodynamique développé pour déterminer les enthalpies de formation.

Un autre projet intitulé «**Frigoporteur diphasique à température positive utilisable en climatisation**» est en cours.

Le **transport d'énergie thermique à longue distance** revêt une grande importance pour l'exploitation de la biomasse, l'utilisation des rejets thermiques des centrales, le chauffage urbain, la valorisation de l'énergie issue de l'incinération des déchets et la capture du CO₂. Les 2 projets «**Cycles thermochimiques pour le transport de chaleur et de froid à longue distance**», qui concernent

l'utilisation de procédés thermochimiques basés sur des transformations réversibles solide-gaz en vue du transport de chaleur ou de froid sur des distances supérieures à 10 km, sont très innovants. Le transport est réalisé par circulation d'un ou deux gaz, à faibles pertes thermiques, qui permettent par leur choix d'accéder à des niveaux de température très variés. L'échange de chaleur endo- exothermique de sorption dans un réacteur autotherme est le point crucial à caractériser pour ce procédé. Ces projets comportent trois études :

- ▶ cycles thermochimiques : une analyse fine de données thermodynamiques de différents réactifs solide-gaz a été réalisée pour sélectionner les couples de réactifs compatibles avec les conditions opératoires du cycle adapté au transport et à la production de froid ;
- ▶ dimensionnement du réacteur autotherme, avec prise en compte des phases actives et intermédiaires du procédé, par une méthode constructale permettant de minimiser la création d'entropie ;
- ▶ analyse fine des pertes possibles dans une tuyauterie gazeuse en traitant le problème en gaz réels.

Electricité

Le vecteur électricité est actuellement l'un des vecteurs de transport et de distribution de l'énergie incontournable et le restera dans le futur. Les ambitions de la recherche dans ce domaine doivent concourir à un développement durable. Les projets traitant de l'électricité, au sens large, sont issus des appels à projets 2002 et 2003 car ce domaine n'a pas été couvert par le dernier appel à projets. Au nombre de 8, ces projets, qui ne représentent que 10 % du nombre total, sont tous terminés.

Les deux premiers projets sont relatifs aux **réseaux électriques**. Le projet «*Etude des transferts d'énergie dans les réseaux*» a permis de comprendre l'impact d'une production décentralisée (sources d'énergie de faible puissance) sur un système électrique caractérisé par de grandes dimensions et de fortes non-linéarités. Une modélisation de grands systèmes complexes avec des sources décentralisées et la caractérisation de ces systèmes à diverses perturbations ont été réalisées. Les résultats montrent clairement différents effets :

- ▶ incidence d'une source locale sur les schémas de protection qu'il faut re-concevoir,
- ▶ introduction de surtension sur le réseau par des générateurs décentralisés et gain significatif grâce au compoundage,
- ▶ impact sur les temps critiques d'élimination des défauts pour un réseau de distribution,
- ▶ impact sur la stabilité du système.

Il est clairement montré que les sources décentralisées peuvent avoir des conséquences néfastes sur la qualité du service. L'étude montre l'intérêt d'études particulières pour l'implantation de petits générateurs sur un réseau de distribution avec une architecture spécifique. Ce projet, ouvrant un large éventail de recherche sur les réseaux, sera utile pour les industriels distributeurs d'électricité et les fabricants d'équipements de systèmes de protection ou de régulateurs.

L'utilisation de filières de production d'électricité décentralisées, avec de fortes variations de charge et leur caractère stochastique, est fortement dépendante des moyens de stockage d'énergie. L'objectif du

projet exploratoire «**Réseaux de stockage de l'électricité**» est l'analyse des différentes filières afin de retenir les plus prometteuses. Les deux principales filières étudiées sont le stockage inertiel et le stockage électrochimique :

- ▶ stockage inertiel : étude de conceptions innovantes et ambitieuses du point de vue technologique, pour une durée de l'ordre de l'heure dans le cadre d'applications stationnaires. Analyse de la gestion de consommateurs couplés au réseau et îlotables pour une production de l'ordre de 10 kW associée à un stockage inertiel ;
- ▶ stockage électrochimique : plusieurs actions de caractérisation de stockages électrochimiques ont été développées : modélisation électrochimique de piles à combustible et modélisation de composants électrochimiques : condensateur, supercondensateur, piles métal-air, accumulateur plomb-acide.

Ce projet exploratoire a montré l'existence de compétences à l'échelle nationale avec un fort potentiel de synergies et le très fort caractère pluridisciplinaire de l'action.

Le projet «**Electronique de puissance haute tension**» complète les travaux réalisés dans le cadre du GDR SEEDS (Systèmes d'Énergie Électrique dans leur Dimension Sociétale). Il concerne la stratégie à utiliser pour insérer directement les convertisseurs de l'électronique de puissance sur des réseaux électriques à moyenne tension (25 kV au lieu de 5 kV actuellement). L'objectif du projet était de proposer des stratégies possibles. Des résultats intéressants ont été obtenus en ce qui concerne :

- ▶ les convertisseurs haute tension silicium :
 - ▶ optimisation des puces haute tension (tension de claquage 6 kV),
 - ▶ contrôle et commande de composants montés en série par une méthode innovante par asservissement numérique pour gérer les problèmes de déséquilibre,
- ▶ les composants semi-conducteurs très haute tension, SiC et diamant :
 - ▶ réalisation d'un banc d'essais de puissance virtuelle, pour des validations expérimentales,
 - ▶ conception d'interrupteurs hybrides haute tension en SiC/Si (tension max 19 kV),
 - ▶ caractérisation sur le diamant.

Ce projet innovant a montré la possibilité de réaliser des convertisseurs à haute tension par des associations série et des convertisseurs multiniveaux à court terme, et à plus long terme la nécessité d'utiliser de nouveaux semi-conducteurs.

L'objectif du projet «**Capacité hybride associant les électrodes de supercondensateurs avec un diélectrique à haute tension de claquage**» est la réalisation de condensateurs hybrides pour assurer un stockage à haute densité d'énergie surfacique. La méthode consiste à utiliser des électrodes poreuses mises en oeuvre dans les supercondensateurs, et à les imprégner avec un matériau diélectrique pour combiner les avantages des deux dispositifs : grande surface spécifique des électrodes et forte rigidité diélectrique des matériaux polymères utilisés dans les condensateurs. Les auteurs ont réalisé des condensateurs électrostatiques dont une électrode au moins est constituée par un conducteur ayant une grande surface spécifique, charbon actif ou nano tubes de carbone. Les diélectriques utilisés ont été successivement du parylène déposé par voie PVD, de l'huile de silicone liquide et du polyéthylène fondu, puis solidifié. Le dépôt de parylène par PVD a conduit à une

augmentation modeste de la capacité, liée à une mauvaise pénétration du parylène dans les pores. L'utilisation d'un diélectrique liquide a permis de *doubler* la capacité par rapport à celle d'un condensateur plan. Une modélisation a montré que les électrodes devaient être nano structurées pour obtenir des augmentations de capacité importantes.

L'objectif du projet «**Capacités de puissance recyclables sécurisées**» est la conception de capacités électrochimiques de puissance, recyclables, non nocives et thermiquement sécurisées en vue de leur intégration dans le domaine de l'électronique portable pour les petits composants ou pour les gros modules de démarrage de moteurs ou pour le stockage d'EnR. Par rapport aux supercapacités actuelles, un des enjeux est le remplacement des solvants organiques toxiques par des produits respectueux de l'environnement et à faible coût. Plusieurs prototypes de couples d'électrodes carbone activé/dioxyde de manganèse, avec des collecteurs de courant en acier inoxydable fonctionnant en milieu aqueux, ont été réalisés :

- ▶ des prototypes de 380 F/2V et 620 F/2V ont montré des performances équivalentes à celles des supercondensateurs à électrodes de carbone en milieu acétonitrile, mais avec des limitations de courant trois fois plus élevées (150 A au lieu de 50 A) ;
- ▶ des prototypes miniatures, qui ont permis de valider les performances électrochimiques et les performances thermiques.

Les résultats les plus intéressants sont économiques, tant pour les cellules que pour leur conditionnement, techniques avec des performances supérieures à celles des supercapacités classiques, et environnementaux par réduction notable de la nocivité des procédés de fabrication.

Le projet «**Microénergie**» est consacré à la réalisation d'une microgénératrice électrique basée sur la récupération d'énergie mécanique en vue du remplacement de piles pour alimenter des systèmes nomades. Dans ce projet, des microgénérateurs électriques basés sur la récupération de l'énergie cinétique de choc de petites billes pour exciter des résonateurs piézoélectriques ont été réalisés. Ce dispositif récupère l'énergie de vibration à basse fréquence, assure la transposition en vibration mécanique haute fréquence, puis la convertit en énergie électrique par l'utilisation de matériaux piézoélectriques. La faisabilité est démontrée, l'énergie récupérée (0,5 μ W pendant 2 ms chaque 20 ms) est encore à optimiser ; des convertisseurs statiques d'énergie ont été développés pour adapter les sources à des systèmes de stockage ; l'adaptation de technologies de conversion statique à des sources à très basse tension et la recherche de systèmes de commande à faible énergie sont les points d'importance qui ont été abordés. Un dispositif d'étude du comportement vibratoire non-linéaire a permis de caractériser différents matériaux potentiellement utilisables dans ce type de dispositif. Pour l'aspect mécanique, on note le développement d'un code de calcul dédié aux vibrations et aux pertes et amortissements par glissement et absorption.

L'étude d'un «**Système électrique autonome pour la récupération de l'énergie des vagues**» a fait l'objet d'un projet exploratoire qui a été suivi d'un projet de recherche de deux ans. Ce projet traite de la réalisation d'un prototype de flotteur, simple et robuste, pour la récupération de l'énergie des vagues de l'ordre du MW par un système électrique autonome. Une modélisation non linéaire de l'interaction houle/structure dans les conditions de fonctionnement d'un système a été développée. La

forme du flotteur et les caractéristiques mécaniques du système interne ont été optimisées. Un simulateur physique du système réel dédié à l'expérimentation des lois de commande a été réalisé. Une maquette à échelle réduite (1/12) a été conçue et réalisée, puis testée dans le bassin de houle multidirectionnelle du Laboratoire de Mécanique des Fluides (LMF) à Nantes. La première campagne d'essais en bassin a eu pour objet la validation des modèles. Des premiers contacts avec des industriels sont pris pour aborder la phase de conception, construction, mise au point et tests à la mer d'un premier prototype à pleine échelle (puissance électrique installée : 500 kW ; budget de plusieurs millions d'euros).

Energie nucléaire

Sur les 2 projets traitant de l'**énergie nucléaire**, un seul, qui a fait l'objet d'un projet exploratoire, est achevé. Il est intitulé «**Cycle nucléaire du thorium et réacteurs à sels fondus**». L'étude de systèmes innovants pour le futur du nucléaire nécessite la mise en place de nouveaux outils de simulation. Une simulation avec la méthode Monte Carlo a permis de calculer précisément les diverses caractéristiques neutroniques de différents types de systèmes. Leur introduction dans des scénarios décrivant comment pourrait s'effectuer la transition du parc actuel vers ces réacteurs innovants a été effectuée. Dans le cadre du Programme, le module traitant de la géométrie du réacteur a été finalisé et testé. Le module d'évolution du combustible est en cours de développement. Des analyses critiques de différents scénarii ont été effectuées :

- ▶ scénarii de poursuite des réacteurs standards à uranium enrichi,
- ▶ scénarii de passage aux réacteurs de 4^{ème} génération pour des réacteurs déployables après 2035 : cycle uranium en réacteurs à neutrons rapides, cycle thorium en réacteurs à sels fondus, couplage des cycles uranium et thorium.

Ces travaux viennent en complément des conclusions du GAT «Fission nucléaire» publiés dans le livre blanc sur l'énergie du Programme (annexe 1, CD-ROM).

Socio-économie

Les séminaires de préparation du Programme en 2001 avaient dégagé la nécessité d'une prise en compte de la composante socio-économique dans le Programme, mobilisant des équipes du CNRS et universitaires susceptibles d'apporter leurs compétences dans le domaine spécifique de l'énergie. L'un des enjeux du Programme a été d'assurer une rencontre fructueuse entre socio-économistes et spécialistes de domaines plus technologiques. La structuration du GAT associée à différentes réunions a permis l'émergence de 4 projets relatifs à la prospective des politiques, la prospective de la demande habitat/transport et les mécanismes d'innovations.

Le projet «**Confluence des perspectives énergétiques et macro-économiques dans la perspective d'un développement durable**» a consisté d'une part, à coupler deux approches, l'une modélisant les technologies, l'autre les mécanismes socio-économiques, d'autre part, à améliorer des modélisations

préexistantes, par exemple en étendant l'horizon prospectif de 2030 à 2050, en affinant la désagrégation régionale (de 38 à 47 régions) et le portefeuille technologique (introduction de flottes de véhicules pour les transports routiers, spécification de trois types de bâtiments, introduction du vecteur hydrogène, du captage du CO₂). Quatre jeux de scénarii successifs ont été réalisés, dont un scénario tendanciel, qui fournit une image possible du monde de l'énergie en 2050 sur la base des tendances et des contraintes actuellement identifiées, et un scénario «Stabilisation 450 - Facteur 4». Les résultats s'avèrent extrêmement riches. Ils couvrent par exemple, selon les scénarii, la structure de la consommation par énergie et son évolution au fil du temps, la répartition géographique de la production de CO₂, celle de la consommation, mais ils dégagent également l'évolution prévisible du coût du baril de pétrole, la trajectoire des filières, l'émergence du charbon (scénario tendanciel), ou l'équilibre du nucléaire et des énergies renouvelables (scénario facteur 4).

Le second projet de recherche est intitulé «**Energie, Transport, Habitat, Environnement, Localisation**». La consommation d'énergie et les émissions de GES sont simulées pour différentes hypothèses sociétales, économiques et technologiques concernant les modes de vie, les localisations d'activités, les types de logements, les offres de transport et les comportements associés. Une simulation des conséquences des hypothèses retenues pour leur pertinence et leur caractère déterminant, à l'horizon 2020-2030 a été réalisée. Pour le logement, la méthode permet de calculer le budget énergie pour un logement type sur la base de la zone climatique, du type d'habitat, du type de chauffage et d'une modélisation du parc. Le modèle développé pour les transports est basé sur les résultats d'une enquête nationale sur les déplacements individuels. Un modèle de densité de localisations opère l'articulation entre les comportements de transport et les choix d'habitat. Un exemple de résultats concerne les émissions de GES : selon que l'on considère des communes denses, des zones périphériques ou des zones rurales très peu denses, le CO₂ par actif sera respectivement de 2, 2,1 et 4,2 t/an. On constate une nette augmentation des émissions pour les véhicules particuliers mais une réduction pour le chauffage et les transports en commun. Ainsi, pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, le facteur 4 sur les émissions de carbone liées aux consommations énergétiques du parc de résidences principales peut techniquement être atteint en 2050 par des interventions sur l'enveloppe, la rénovation des équipements, la substitution d'énergie (solaire thermique, bois, pompes à chaleur, géothermie).

Le projet exploratoire «**Electricité verte**» est destiné à approfondir la question de l'efficacité de la tarification verte comme instrument de promotion des investissements en énergies renouvelables. Le travail d'enquête repose sur quatre catégories de variables explicatives, qui sont croisées entre elles ou avec les dispositions à payer exprimées par les répondants : les modalités du système de paiement (mode de souscription et de collecte), le profil des individus (degré d'individualisme et de libéralisme, caractéristiques socioéconomiques), l'existence de comportements stratégiques (c'est-à-dire la façon dont chacun peut se déterminer par rapport au comportement des autres en pensant à ceux qui vont payer un surcoût pour accéder à l'électricité verte), l'influence de l'information. Un certain nombre de résultats intéressants ont été mis en évidence :

- ▶ méfiance vis-à-vis des organismes de certification et de l'entité en charge de la collecte et du développement des EnR,

- ▶ segmentation des clients vis-à-vis de l'achat de l'électricité verte en fonction de leur statut social,
- ▶ crainte des comportements de passager clandestin des autres clients électriques,
- ▶ intérêt d'une information très explicite.

Le dernier projet exploratoire de socio-économie concerne l'«**Analyse exploratoire des dispositifs de certificats verts pour la promotion des énergies renouvelables**». La mise en place de marchés de certificats verts (adossés à des quotas décentralisés) est a priori plus compatible avec le mode actuel de libéralisation des marchés de l'électricité que le système régulé des prix garantis, considéré comme trop coûteux ; le système des appels d'offre a lui aussi montré ses limites et la mise en place d'un système de quotas individuels adossés à des marchés de certificats verts semble aujourd'hui la meilleure solution (il a déjà été adopté par l'Angleterre et l'Italie et il semble avoir les faveurs de Bruxelles). La représentation d'un tel marché de certificats verts à l'échelle européenne a été réalisée en utilisant des courbes de coût marginal de production d'électricité verte grâce au modèle POLES et au logiciel ASPEN (pour 14 Etats membres). Les résultats font apparaître :

- ▶ que la mise en place d'un tel marché permettrait de réduire le prix d'équilibre des certificats par rapport à la coexistence de 14 marchés nationaux,
- ▶ que la localisation des installations des capacités de production serait modifiée par rapport à la situation initiale de référence,
- ▶ que le choix du panier des technologies utilisées serait également différent de ce qu'il serait en l'absence d'un tel marché européen (équilibre entre l'éolien, la biomasse, l'hydraulique, le photovoltaïque).



Activités des GAT et prospectives



De 2002 à 2004, les activités des GAT, recensés dans le tableau 2, ont essentiellement été orientées vers l'identification de l'état de la recherche nationale, européenne, voire internationale dans les thèmes choisis, vers des études prospectives et la hiérarchisation des verrous à lever dans le cadre d'une stratégie, d'une part, à court et moyen terme sur des options matures ou quasi-telles, d'autre part, à long terme avec des démonstrations à risque.

Les travaux des GAT sur cette période sont à la base du livre blanc, achevé en décembre 2003 et largement diffusé en mars 2004. Il est intitulé : **"Une politique de recherche et développement pour des énergies durables"**. Ce document de 245 pages figure intégralement dans le CD-ROM (annexe 1). Il est composé tout d'abord d'une présentation des principes fondateurs et des axes stratégiques de recherche et développement, puis des rapports relatifs aux différents thèmes rédigés par les coordonnateurs des GAT dans l'ordre suivant :

- ▀ Les piles à combustible et leur gestion
- ▀ L'habitat primaire et tertiaire
- ▀ L'énergie solaire thermique
- ▀ Les composants photovoltaïques pour la production d'énergie
- ▀ La gestion du froid et de la chaleur
- ▀ Les ressources à partir de la biomasse
- ▀ La combustion et la capture du CO₂
- ▀ Le nucléaire, fission du futur
- ▀ La fusion thermonucléaire
- ▀ La distribution et le stockage de l'électricité
- ▀ La socio-économie de l'énergie.

De 2004 à 2006, de nouveaux GAT ont été constitués dans les thèmes précisés dans le tableau 3 auquel il convient d'ajouter la socio-économie. Pour leurs analyses les coordonnateurs se sont largement appuyés sur la communauté scientifique afférente à leur domaine. Ils ont aussi recensé les différents laboratoires travaillant sur les thématiques de leur champ disciplinaire et ont identifié des correspondants, dont la liste est répertoriée en annexe 4. Compte tenu de leur volume, les rapports d'activités de chaque GAT ne figurent pas in extenso dans le corpus de ce rapport, mais ils sont consultables sur le CD-ROM (annexe 5). Leurs travaux ont servi de base à la préparation du Programme Interdisciplinaire Energie 2006-2009. Une synthèse en a été présentée au cours d'un séminaire, qui s'est tenu à Cachan le 26 juin 2006. Les thématiques présentées au cours de ce séminaire préparatoire au PIE2 ont été plus larges et concernaient des domaines non couverts par les GAT, comme le domaine de l'électricité, des matériaux, etc. Une synthèse de la prospective effectuée par ces GAT de 2004 à 2006 est présentée ci-dessous.

GAT "Filière hydrogène et piles à combustible" (Claude Lamy)

Le développement de la «Filière Hydrogène», vecteur énergétique du futur, nécessite que soit levé un certain nombre de verrous technologiques, depuis la production d'hydrogène (à partir de différentes ressources fossiles ou renouvelables), jusqu'à son utilisation finale dans une pile à combustible (PACo), à basse température (PEMFC) ou à haute température (SOFC), en passant par son transport et son stockage. De plus, les aspects socio-économiques et impacts environnementaux (coûts de production, diminution de l'émission de gaz à effet de serre, acceptabilité par le public, etc.), ainsi que les considérations sur la sécurité de l'ensemble du cycle devraient être pris en compte dans une analyse globale.

Les différentes applications des systèmes PACo concernent la production d'énergie électrique stationnaire, la traction dans les transports automobiles, ferroviaires et maritimes, les applications domestiques (coproduction d'énergie électrique et de chaleur), les auxiliaires de puissance pour l'automobile et l'aérospatial, les sources de secours, l'alimentation de sites isolés, les systèmes électroniques portables.

L'objectif du GAT est l'examen du système pile à combustible, depuis la production de l'hydrogène jusqu'à son utilisation, en y incluant le contrôle du système, sa gestion et les problématiques sociétales et environnementales associées.

Production de l'hydrogène

Enjeux

L'approvisionnement futur en énergie est confronté au triple problème de l'épuisement et/ou du renchérissement des hydrocarbures fossiles, de l'environnement et des problèmes de sécurité d'approvisionnement. L'hydrogène apparaît comme un bon candidat-vecteur car il est adapté en amont à la plupart des sources d'énergie primaire pour sa production (des hydrocarbures fossiles jusqu'aux sources renouvelables et nucléaires pour le long terme) et en aval comme source d'énergie chimique idéale pour les piles à combustible, les moteurs thermiques et dans le domaine de la dépollution.

Verrous

La production d'hydrogène à bas coût existe actuellement. Cependant les verrous sont de plusieurs sortes :

- ▶ à court terme, améliorer et innover sur les technologies existantes (reformage d'hydrocarbures), du fait de la demande pour les applications décentralisées et embarquées de reformeurs compacts, de petit débit, à cinétique performante et à bas coûts à partir de plusieurs combustibles. En effet, l'investissement est prohibitif lorsque la quantité d'hydrogène à produire est faible (< 500 Nm³/h), cas des piles à combustible et applications sur site (gamme 0-300 Nm³/h).
- ▶ à moyen et long terme, développer de nouvelles solutions et technologies de production propre d'hydrogène en grandes quantités, centralisées ou délocalisées, à faible émission de gaz à effet de serre.

Actions à mener

Concernant le court terme, le vaporeformage est une technologie mature dans le cas des unités de grande capacité. Dans la plupart des cas, il s'agit du reformage de gaz naturel. De plus, la quasi-totalité de l'hydrogène est produite actuellement pour des applications chimiques ou de raffinage. En tant que ressource énergétique, la production d'hydrogène devra subir de profondes mutations. A côté de production de masse sur sites fixes, d'autres solutions alternatives devront être trouvées pour des productions de moyenne importance très flexibles. Celles-ci feront appel à des productions en "station" à partir de carburants divers : hydrocarbures (GN, GPL) mais aussi biocarburants. Les procédés pourront être du type vaporeformage (H_2O) ou autotherme avec (H_2O+O_2) en adaptant spécialement le réacteur et ses annexes à l'environnement "station", avec un haut degré d'intégration et de compacité du système tout en conservant une grande fiabilité. Les réacteurs-échangeurs microstructurés devraient être particulièrement adaptés à ces procédés. Des efforts considérables devront être entrepris pour simplifier et miniaturiser les procédés de purification : water-gas shift, oxydation préférentielle de CO. Enfin, des systèmes intégrés de réaction/purification pourront mettre en jeu des réacteurs membranaires. Dans ce domaine en particulier, des efforts importants visant à fiabiliser les membranes tout en diminuant leur épaisseur (technologie 5 μm ou moins) devront être entrepris.

Concernant le moyen et le long terme pour la production propre de l'hydrogène, deux aspects sont à étudier :

- ▶ production massive à haut rendement sans émissions de CO_2 : par électrolyse de l'eau à haute température ou cycles thermochimiques, l'énergie thermique étant fournie par un réacteur nucléaire, une centrale solaire à concentration ou une source géothermique. Des recherches amont doivent porter sur les composants haute température constituant les modules, stacks, etc. et sur les matériaux associés aux cycles thermochimiques ;
- ▶ production décentralisée à partir d'énergies renouvelables intermittentes ou reformage de multicomcombustibles en privilégiant les biocombustibles. Des études des couplages production/stockage et de nouveaux catalyseurs à bas coûts et fiables doivent être engagées.

Distribution et stockage de l'hydrogène

Les recherches dans le domaine du stockage de l'hydrogène visent d'une part, des facilités d'usage en terme de capacités de stockage et de dynamique de stockage/déstockage, d'autre part, un haut degré de sécurité pendant les opérations normales de remplissage et de soutirage de l'hydrogène ainsi que dans les situations accidentelles, contre les risques d'inflammation et d'explosion.

Réseaux de transport et de distribution

Il faut distinguer les réseaux de transport, qui impliquent des canalisations en acier pour l'hydrogène sous haute pression, et les réseaux de distribution concernés par des matériaux polymères essentiellement. Les recherches à prévoir dans ce domaine sont les suivantes :

- ▶ étude de la fragilisation des métaux et de revêtements protecteurs des tubes,
- ▶ étude de nouveaux matériaux polymères présentant de bonnes propriétés de barrières à l'hydrogène ainsi que l'étude de multicouches.

Les moyens de raccordement (soudure, collage) devront être également étudiés du point de vue chimique et mécanique.

Stockage de l'hydrogène

On peut schématiquement distinguer plusieurs types de stockage à des degrés de maturité divers et satisfaisant plus ou moins bien les objectifs de performances en terme de capacités massique et volumique de stockage et de sécurité :

- ▶ le stockage sous forme de gaz comprimé à très haute pression, en l'occurrence 700 bar,
- ▶ le stockage cryogénique sous forme d'hydrogène liquide à 20 K,
- ▶ le stockage à basse pression par absorption réversible à température modérée (< 100°C) ou bien sous forme d'hydrures produisant de l'hydrogène par réaction chimique.

Le stockage cryogénique ne semble plus d'actualité et sera réservé à des applications spatiales. Pour le court terme, des voies d'applications basées sur le gaz sous haute pression semblent se dessiner.

Actions à prévoir

Le stockage solide sous forme d'hydrure sous faible pression et à température modérée doit continuer à être pris en compte dans le Programme Energie du CNRS. Les réservoirs doivent répondre à certains critères :

- ▶ capacités de stockage massique et volumique élevées,
- ▶ température et pression de fonctionnement modérées,
- ▶ temps de remplissage rapide et débit adapté à l'application,
- ▶ bonne tenue au cyclage,
- ▶ faible coût.

Les matériaux concernés sont :

- ▶ les hydrures complexes réversibles, tels que les alanates ou les nitrures métalliques, afin d'améliorer leur cinétique de désorption, de diminuer la température de réversibilité, de comprendre le rôle des catalyseurs et définir la nature des produits de réaction intermédiaires ;
- ▶ les matrices nanoporeuses, offrant une grande surface développée pour la physisorption d'hydrogène, d'autant plus efficaces que la température de la matrice est plus basse, d'où la possibilité de cryo-adsorption à la température de l'azote liquide (77 K). Dans ce cas un effort doit être poursuivi pour augmenter la température de réversibilité d'adsorption de l'hydrogène ;
- ▶ les composés intermétalliques qui ont déjà fait leur preuve pour les applications stationnaires en raison de l'adaptabilité de leurs propriétés thermodynamiques et de la sécurité de leur utilisation. Les efforts de recherches concerneront essentiellement l'augmentation de leurs capacités massiques, de leurs conductivités thermiques et la compréhension des phénomènes de vieillissement.

Piles à combustible

Dans le cadre du programme PANH, l'ANR a orienté ses appels à projets vers les piles les plus couramment envisagées, PEMFC et SOFC, dans le cadre de partenariats industriels et vers divers

problèmes préparant la phase de commercialisation : tenue en conditions extrêmes, vieillissement, etc. Cependant il reste un certain nombre de sujets plus fondamentaux parmi lesquels on peut trouver des lignes directrices pour le Programme Energie.

Piles du type PEMFC

Trois points clés contrôlent les progrès attendus : la chute ohmique (résistance électrique de la membrane et des interfaces électrodes/électrolyte), la polarisation d'activation (limitation de la vitesse des échanges électroniques) et la polarisation de concentration (limitation des vitesses de transport des réactifs et des produits de réaction vers les sites catalytiques des électrodes). Un objectif pourrait être de viser un gain d'un facteur de l'ordre de 3 de la puissance spécifique (de 0,5 W/cm² à 1,5 W/cm²), ce qui, pour une pile de 1 kW pourrait se traduire par un abaissement équivalent du coût lié à la membrane. Un gain complémentaire du même ordre de grandeur est à envisager en recherchant de nouveaux matériaux de membrane. Les axes de recherches à privilégier sont indiqués ci-après.

Membranes

- ▶ conception de nouveaux matériaux membranaires permettant de remplacer le Nafion[®] et d'accroître les performances (hydratation, membranes composites ou hybrides organique/inorganique, nouveaux polymères portant des fonctions autres que sulfoniques, etc.) ;
- ▶ élaboration des matériaux et mise en forme des membranes par la mise en oeuvre de nouvelles méthodes (CVD plasma, sol-gel, etc.) ;
- ▶ caractérisation des matériaux obtenus, en particulier détermination des relations entre microstructure et propriétés de transport, tenues mécanique, chimique et thermique.

Catalyseurs

Il s'agit d'augmenter de façon significative les vitesses de réaction, donc les densités de courant, conduisant ainsi à une augmentation des densités d'énergie et de puissance :

- ▶ *Conception* : la réduction de la quantité de platine dans les électrodes de piles à combustible implique le développement de différentes méthodes de synthèse qui permettent d'optimiser le taux d'utilisation de ce métal, i.e. sa dispersion, sa tolérance aux poisons et aux divers polluants et sa répartition spatiale au sein des électrodes (catalyseurs nanostructurés).
- ▶ *Caractérisation* des catalyseurs par différentes méthodes physiques (diffraction X, microscopie électronique, EDX, etc.) afin de déterminer la taille des particules, leur composition, leur structure et leurs caractéristiques électrochimiques.
- ▶ *Mise en forme* : elle nécessite des études sur la nature et la structure de la couche de diffusion (charge de carbone, taux de téflon, etc.) et de la couche active (nature du noir de carbone, rapport métal/C, rapport métal/Nafion[®], etc.) des électrodes de pile.

Cœur de pile

On recherchera des structures innovantes en vue de la réalisation de l'Assemblage Membrane-Electrodes (AME) de façon à augmenter les transports et les transferts. Des métrologies nouvelles, s'appuyant éventuellement sur des méthodes inverses, devront permettre d'obtenir des informations « locales » concernant ces phénomènes, informations susceptibles d'améliorer la fiabilité et la

pertinence de modèles multiphysiques et multiéchelles d'aide à la compréhension et à la prédiction du comportement de la pile (phénomènes transitoires, rôle de la composition des gaz, dilution des réactifs, humidification, température, etc.). La caractérisation des paramètres de transport de l'eau pourrait utiliser des techniques Résonance Magnétique Nucléaire et neutroniques et/ou des capteurs spécifiques (microthermocouples, capteurs thermiques à quartz, capteurs distribués sur la base de la technologie « couche mince », etc).

Vieillessement

Les objectifs de durabilité visés sont très contraignants pour les applications automobiles (5000 h de fonctionnement avec des cycles dynamiques) ou stationnaires (40000 h de fonctionnement en quasi-statique). Les recherches porteront à la fois sur la compréhension des mécanismes de dégradation à l'échelle des composants et sur l'identification des modes de défaillance des AMEs dans différentes conditions de fonctionnement.

Piles du type SOFC

Les éléments constitutifs d'une pile SOFC sont des céramiques à base d'oxydes et la pile fonctionne aujourd'hui à haute température (900 °C) en raison de la conductivité ionique limitée des électrolytes classiques utilisés à plus basse température. Cette température de fonctionnement élevée est à l'origine d'un vieillissement rapide des matériaux, provoqué par une réactivité chimique parfois importante entre certains éléments. Les cycles en température peuvent aussi provoquer des dommages en raison d'une mauvaise tenue mécanique des matériaux. Enfin, le fonctionnement à ces températures nécessite d'utiliser des matériaux d'interconnexion onéreux (chromite de lanthane ou aciers réfractaires). Afin de pallier ces inconvénients, la diminution de la température de fonctionnement jusqu'à 650 - 700 °C apparaît être le meilleur compromis (utilisation d'aciers plus classiques pour les plaques d'interconnexion et pour le système en général, limitation des phénomènes d'interdiffusion et de réactivité des solides). La diminution de température entraîne alors une augmentation des chutes ohmiques et des surtensions liées respectivement à la diminution de la conductivité de l'électrolyte et à la cinétique ralentie des réactions électrochimiques. Ceci nécessite d'améliorer les performances de quasiment tous les éléments constitutifs du cœur de pile, en particulier les matériaux.

L'un des points clés concerne la recherche d'un nouvel **électrolyte** solide pour un fonctionnement à 700 °C. Des pistes prometteuses à ces niveaux de température devront être explorées, tels les silicates de structure du type apatite, les LAMOX, ou encore de nouvelles structures du type cuspidine.

Concernant la **cathode**, l'abaissement de la température de fonctionnement nécessite d'améliorer aussi et de manière significative les performances des cathodes à oxygène, sièges de fortes surtensions. Depuis quelques années est apparu le concept de matériaux de cathode *conducteurs mixtes* (à la fois conducteurs électroniques et ioniques par ions O²⁻), ce qui permettrait la délocalisation de la réduction de l'oxygène sur tout le volume de l'électrode, situation théoriquement beaucoup plus favorable. Parmi les voies innovantes, se situent les matériaux de la famille A₂MO_{4+δ}, avec A = La, Pr ou Nd et M = Ni ou Cu. D'autres oxydes de types structuraux nouveaux devraient être investigués. Pour ce qui est de l'**anode**, elle semble moins problématique. Cependant, si les cermets nickel-électrolyte conviennent

pour l'utilisation de l'hydrogène, la mise au point de nouveaux catalyseurs s'avère aujourd'hui indispensable, soit pour l'utilisation du gaz naturel comme combustible (catalyseur insensible au soufre), soit pour l'utilisation directe de gaz de biomasse. Le fonctionnement en reformage interne du gaz naturel pourrait également faire l'objet de nouveaux développements.

Un effort est attendu dans le domaine de la synthèse des poudres fines (chimie douce, voie sol/gel, voie hydrothermale, procédés pyrosol, etc.) et celui des procédés de réalisation de la cellule élémentaire. La caractérisation des interfaces électrodes/électrolyte et électrodes/milieu ambiant devrait conduire à une maîtrise accrue des propriétés superficielles des électrodes et de la compréhension des phénomènes catalytiques.

Piles du type PCFC

Un consensus est apparu récemment en faveur du développement de systèmes capables de fonctionner à des températures intermédiaires de l'ordre de 400-600 °C, en raison des avantages suivants :

- la pile pourrait être alimentée en hydrogène, mais sans la nécessité d'une teneur très faible en CO (< 10 ppm) ; un reformage classique pourrait être suffisant ;
- la cogénération de la chaleur produite devient intéressante pour certaines applications, comme le résidentiel ;
- les problèmes liés au vieillissement et au coût élevé des matériaux nécessaires à haute température disparaissent.

Les meilleurs conducteurs anioniques comme la cérine ou des oxydes de bismuth dopés pourraient convenir mais leur stabilité dans les conditions sévères d'utilisation d'une pile à combustible est très faible. Il faut alors se tourner vers des systèmes à base de céramiques faisant appel à des électrolytes conducteurs protoniques qui permettraient d'atteindre une conduction significative à des températures basses. Ceci constituerait une véritable rupture technologique et, dans ce cas aussi, la recherche de catalyseurs d'électrodes adaptés est nécessaire.

Piles du type SAMFC

Les piles à membrane alcaline (SAMFC), dont l'électrolyte est une membrane échangeuse d'ion OH⁻, ont un grand intérêt car c'est un système tout solide et compact, qui peut utiliser des catalyseurs non nobles aux deux électrodes. De plus la réactivité de combustibles, autres que l'hydrogène, tels les alcools, est plus élevée en milieu alcalin qu'en milieu acide. Dans ce contexte, l'éthanol et les alcools supérieurs issus de la biomasse (propanol, propane-diols, glycérol, etc.) sont beaucoup plus réactifs en milieu alcalin, mais cela nécessite des recherches sur de nouveaux catalyseurs pluri-métalliques et multifonctionnels permettant d'oxyder plus loin la molécule.

La synthèse en film mince et la caractérisation des propriétés électrochimiques de nouvelles membranes anioniques, notamment à base d'ammonium quaternaire, constituent d'autres points durs de la recherche. Des substitutions fonctionnelles sont à rechercher, permettant d'accroître leur conductivité ionique et leurs stabilités chimique et thermique.

Piles du type DAFC et autres piles à combustion directe

L'oxydation directe d'un combustible autre que l'hydrogène, au sein d'une pile à combustion directe, présente beaucoup d'avantages :

- ▶ utilisation de combustibles liquides aisément transportables et stockables,
- ▶ absence de système de reformage complexe et volumineux.

De nombreux combustibles liquides sont envisageables. Outre les alcools (méthanol, éthanol, etc.), les éthers, tels le diméthyl-éther et les dérivés du méthane (gaz naturel), tels le diméthoxyméthane, le triméthoxyméthane, sont réactifs à température ambiante. Le diméthyl-éther est particulièrement intéressant car sa formule brute est identique à celle de l'éthanol (même densité massique d'énergie, soit 8 kWh/kg) et son oxydation est plus facile du fait de l'absence de liaison C-C. De plus, c'est un produit de substitution des hydrocarbures que les pétroliers pourraient facilement distribuer au sein des réseaux actuels. La combustion directe de ces combustibles oxygénés dans une PACo nécessite des études fondamentales sur leur réactivité électrochimique, sur les mécanismes des réactions d'oxydation et sur la formulation de catalyseurs adaptés pour l'activation de chaque étape du mécanisme.

GAT "Bâtiment" (François Penot)

Le secteur des bâtiments résidentiels et tertiaires est un gros consommateur d'énergie. De plus, l'énergie utilisée n'est pas nécessairement la mieux adaptée. Il est nécessaire de limiter cette consommation énergétique en réduisant les besoins et en visant l'efficacité énergétique optimale et de rechercher des sources nouvelles à intégrer dans le bâtiment. Enfin les émissions de gaz à effet de serre sont à considérer parmi les tout premiers postes. Pour atteindre ces objectifs, des développements technologiques sont nécessaires, ils doivent s'appuyer sur des résultats de recherche à caractère fondamental.

A l'origine, ce GAT, appelé "GAT Habitat" a fonctionné pendant 2 ans, puis a fusionné avec les GAT "Gestion des réseaux d'électricité" et "Cellules photovoltaïques du futur". Aussi, le rapport d'activités de ce GAT (CD-ROM - annexe 5) porte sur les différents domaines suivants :

- ▶ aspects thermiques et sciences de l'ingénieur
- ▶ solaire photovoltaïque
- ▶ réseaux d'électricité et de stockage de l'énergie
- ▶ les travaux relatifs à INES.

Seules les perspectives portant sur les premier et dernier points sont présentées ci-dessous.

Aspects thermiques et sciences de l'ingénieur

Il faut améliorer la connaissance et la compréhension des phénomènes relatifs aux transferts de chaleur (radiatifs, conductifs et convectifs, aux échelles de l'habitat), de masse (espèces chimiques, odeurs, particules, etc.) en insistant sur leurs caractéristiques non linéaires et instationnaires. Cela doit déboucher sur la maîtrise de la qualité des ambiances (éclairage, acoustique, confort

hygrothermique, etc.), grâce à des modèles réalistes et à des outils d'instrumentation et d'investigation adaptés. Des recherches sont donc à entreprendre :

- ▶ concernant les méthodes d'analyse (modélisation détaillée de la thermoaéraulique, mise en place de modèles réduits, algorithmes issus de l'intelligence artificielle, analyse système, méthodes inverses), les méthodes de gestion optimisée et d'intégration de l'énergie dans l'habitat et son environnement à différentes échelles allant de l'appareil à usage domestique au quartier urbain, en considérant les situations transitoires et des données aléatoires ou chaotiques ;
- ▶ pour imaginer, concevoir, tester des systèmes innovants valorisant les énergies renouvelables dans l'habitat (solaire passif et actif, géothermie, eaux usées, etc.).

Enfin, ces recherches qui conduisent directement à des réalisations concrètes doivent faire l'objet d'investigations à caractère social et économique pour faciliter et encourager (acceptabilité culturelle) leur pénétration dans le bâtiment.

Grands axes de recherche identifiés

Il s'agit (sans fixer de priorité) du thème « **Intérieur** » consacré aux couplages, au niveau des parois, des phénomènes thermoaérauliques et radiatifs, à la caractérisation des performances des équipements climatiques et de la qualité de l'air intérieur, au contrôle local de la ventilation et à l'optimisation des techniques de ventilation sous contraintes extérieures propres au milieu urbain, aux techniques avancées de pilotage multicritères d'installations appliquées à l'efficacité et à la maîtrise de la qualité des ambiances, au développement de techniques de mesures du confort adaptées au contrôle local, à l'établissement des limites des modèles actuels.

Pour le thème « **Efficacité énergétique des enveloppes** », l'ambition est de contribuer à l'application de la démarche « développement durable » dans le secteur de la construction par optimisation de la conception des enveloppes. On s'intéresse alors aux paramètres allant de données complètement passives (géométrie et propriétés des matériaux) jusqu'à la gestion automatique (ouvertures de protections solaires) et, pourquoi pas, à des fonctions actives de la production de l'énergie. Enfin la réflexion porte sur l'intégration de nouveaux concepts dans les enveloppes, avec une utilisation rationnelle des matériaux, la recherche de nouveaux matériaux isolants (superisolants, effets diodes ou même transistors thermiques, etc.).

Pour le thème « **environnement du bâtiment** », l'essentiel de l'effort devrait porter sur le développement d'une méthodologie permettant d'analyser les interactions entre microclimat urbain et le bâti. La démarche est complétée par la mise au point d'outils permettant d'évaluer la pertinence d'actions menées sur l'un ou l'autre de ces deux milieux sur la demande énergétique globale. La gestion de cette interface entre les deux milieux est aussi une clé indispensable à une gestion environnementale globale. La prise en compte des contraintes locales des microclimats urbains est une nécessité ; elle passe par une bonne connaissance de ce microclimat urbain (atmosphère urbaine, ensoleillement, etc.), de son impact sur le bâti (morphologie urbaine, matériaux) et le non bâti (espaces vaires, végétation, etc.) et de la thermoaéraulique de fragments urbains à l'aide d'actions spécifiques.

Dans le thème « **Systèmes et réseaux adaptés aux bâtiments HQE** », il s'agit du développement de modèles détaillés de systèmes énergétiques pour la couverture des besoins des bâtiments, non plus sur le seul critère du rendement énergétique mais à différentes échelles, en prenant en compte l'impact global des systèmes sur l'environnement. Ce travail doit permettre d'améliorer les systèmes énergétiques existants et d'étudier des systèmes énergétiques innovants qui, demain, permettront l'autonomie énergétique du bâti (démarche HQE et bâtiments « zéro énergie »). Cela concerne par exemple la conception optimale des réseaux de distribution d'énergies multisources, multi stockages et multi vecteurs (électricité, photovoltaïque, chaleur, froid, etc.).

D'un point de vue stratégique les perspectives de développement de la recherche sur le bâtiment durable pourraient être organisées de la façon suivante. Considérant les perspectives de développement de la recherche nationale dans le domaine du bâtiment existant et neuf, deux échelles de temps essentielles doivent être considérées, associées à deux stratégies complémentaires.

Immédiatement

A très court terme, la stratégie la plus simple et la plus profitable est très certainement une stratégie incrémentale d'intégration des technologies aujourd'hui disponibles et de promotion de démonstrateurs. En effet, un certain nombre de technologies résultant des recherches développées ces dernières années peuvent être considérées comme mûres et il est important à court terme de les valoriser sous forme de bâtiments intégrateurs ou démonstrateurs. L'objectif assigné est la réalisation d'un parc démonstratif de bâtiments à bilan énergétique primaire nul ou à émission en CO₂ nulle. La réalisation d'un tel parc associant les collectivités locales, des équipes de recherche, des décideurs et tous les acteurs professionnels du bâtiment doit permettre de créer une dynamique autour du développement de constructions durables et d'en faire des « outils pédagogiques » à l'usage de l'ensemble des citoyens.

Ces bâtiments doivent répondre à un besoin et avoir une vocation purement utilitaire : maison individuelle, petit immeuble locatif, bâtiment d'éducation, bâtiment public, etc. Ils devront faire l'objet d'un suivi expérimental rigoureux pour en évaluer in situ les réelles performances. Il ne s'agit pas en effet de créer des bâtiments purement démonstratifs, mais d'évaluer leur contribution réelle au développement durable en fonctionnement normal de l'activité à laquelle ils sont destinés. A ce niveau, l'effort de recherche doit porter tout d'abord sur l'intégration des systèmes et des stratégies de gestion énergétique globale, de contrôle des ambiances intérieures et de couplage des systèmes. Il doit aussi être consenti sur la validation des propositions, *a priori* au niveau des projets à l'aide d'outils de simulation ad hoc, et *a posteriori* par des suivis expérimentaux spécifiques et des enquêtes de satisfaction auprès des usagers en vue d'une évaluation environnementale et sanitaire des ambiances et des produits de la construction.

La priorité au niveau de la recherche est le développement d'outils d'évaluation globale et de gestion : plate-forme de modélisation, bâtiment intelligent, métrologie, etc.

Pour le moyen et le long terme (horizon 10 à 15 ans)

A moyen terme ou à long terme, une stratégie purement incrémentale d'amélioration des techniques et des matériaux deviendra vite limitée dans le contexte du facteur 4. A ce niveau d'échelle de temps, l'adoption d'une stratégie de rupture technologique devient indispensable pour effectuer de réels sauts technologiques. Pour réussir cette gageure, il faut développer dès à présent une compétence accrue sur des thèmes porteurs de manière coordonnée. L'objectif est clairement d'identifier et de développer de nouvelles compétences qui conduisent par les résultats de leurs recherches à des sauts technologiques significatifs. Cet effort de recherche doit à la fois être disciplinaire et transdisciplinaire. En effet, une expertise de très haut niveau est nécessaire dans chaque secteur, mais elle ne peut être dissociée d'une approche globale de la problématique propre au bâtiment existant ou à construire.

Un certain nombre de thèmes fédérateurs a, dès à présent, été identifié : le vecteur air, les matériaux à très haute performance ou à fonction particulière, les systèmes énergétiques novateurs, les interactions homme/ambiances, la qualité de l'air intérieur, les interactions microclimat urbain/bâtiment, les études sociologiques sur l'acceptabilité des technologies et le développement de méthodologies d'évaluation des impacts environnementaux réels des technologies développées, le concept de bâtiment adaptatif.

Pour éviter une dispersion des moyens, il semble important aujourd'hui de renforcer la recherche dans ce domaine par l'élaboration de programmes structurants et pluriannuels dans chaque domaine. Cette politique pourrait s'organiser autour de l'INES à Chambéry en y associant le réseau national animé par le GAT.

Les travaux relatifs à l'INES

Depuis le printemps 2004, à la demande du CNRS, le GAT a réfléchi à la définition du projet Institut National d'Énergie Solaire (INES). Ce projet, soutenu par la région Rhône-Alpes et le département de la Savoie, présente un volet recherche qui nécessite des infrastructures que la commission issue du GAT a définies. Des réunions périodiques ont eu lieu et des missions de visite d'installations européennes ont été effectuées.

La vocation d'INES est de contribuer à l'optimisation du rôle de l'Énergie Solaire dans la satisfaction des besoins énergétiques des bâtiments du type résidentiel et tertiaire. En vue d'une meilleure maîtrise de la physique du bâtiment et de la gestion des flux énergétiques en présence de systèmes utilisant l'énergie solaire, des activités de R&D, de soutien au développement de produits et de formation/information des acteurs du marché sont mises en œuvre.

Les premiers champs d'investigations portent sur :

- les systèmes électriques photovoltaïques (production, distribution, utilisation),
- les systèmes thermiques (production, distribution, utilisation)

et leur intégration au bâtiment en vue d'en améliorer les performances énergétiques (aller vers le bâtiment dit à "zéro énergie").

Dans ce contexte, des équipements de démonstration adaptés aux différentes facettes de la mission d'INES seront mis en œuvre :

- ▶ des équipements, qui permettront de valider par l'expérimentation des modèles de comportements énergétiques de bâtiments ;
- ▶ d'autres moyens d'investigations, du type bancs de caractérisation, pour tester les performances de nouveaux composants et systèmes solaires intégrables au bâtiment avec évaluation de l'impact de cette intégration sur les performances énergétiques du bâtiment ;
- ▶ des constructions intégrant à l'échelle 1 des composants et systèmes proches de leur version commercialisable sur le marché afin d'en faire valoir les atouts avec un effet de vitrine technologique ;
- ▶ des moyens de promotion technique, à forte valeur pédagogique, destinés à montrer la part que peut prendre l'énergie solaire dans la vie quotidienne des bâtiments.

Le rôle du CNRS, associé à l'Université de Savoie, est de mener des travaux de recherche amont, dans le cadre d'une coopération avec le CEA et le CSTB, qui opèrent plus dans le domaine technologique.

GAT "Biomasse - Combustion - CO₂" (Jean-Michel MOST)

De 2002 à 2004, le GAT s'est vu confier la prospective dans le domaine de la combustion et de la capture du CO₂. De 2004 à 2006, la communauté de la biomasse "voie sèche" s'est rapprochée de celles de la combustion et de la capture du CO₂. Ainsi, tout naturellement, ces différents domaines ont été regroupés, ce qui a conduit à la structuration du nouveau GAT "Biomasse - Combustion - Capture et séquestration du CO₂".

Dans les vingt prochaines années, des technologies économiquement viables devront être disponibles pour produire de l'énergie et de la chaleur à partir d'une conversion chimique de l'énergie de multi combustibles et à bas coût,

- ▶ en respectant l'environnement par une réduction drastique des émissions de polluants (oxydes d'azote et de soufre, particules, etc.) ;
- ▶ en limitant les rejets de gaz à effet de serre (GES) ;
- ▶ en étant flexibles à tout type de combustibles (combustibles issus de la biomasse, gaz naturel, charbon, déchets industriels, hospitaliers ou domestiques, etc.) ;
- ▶ en restant compatibles avec la capture, puis le stockage définitif des gaz à effet de serre produits.

Combustion

La combustion des combustibles fossiles restera encore pour de nombreuses années le procédé principal pour produire de l'énergie par conversion chimique. Le challenge réside dans la mise au point de procédés permettant une diminution des rejets de polluants (oxydes d'azote et de soufre) et une augmentation de l'efficacité du processus global de production d'énergie.

Quelques problématiques à développer

De nouveaux régimes de combustion sont recherchés pour des applications à la fois de turbines à gaz (combustion principalement prémélangée), de fours, de chaudières (combustion non prémélangée), de centrales à charbon pulvérisé et de lits fluidisés (combustion diphasique).

Flexibilité des installations aux combustibles

- ▶ flexibilité au comburant et au combustible (hydrocarbures classiques, gaz naturel, gaz de synthèse (CO/H₂) issus de la gazéification de la biomasse ou du charbon, hydrogène). Une étape intermédiaire devra s'intéresser à la combustion de mélanges gaz naturel/hydrogène ;
- ▶ combustion diphasique liquide/gaz et solide/gaz de liquides issus de la biomasse concentrée, de particules de charbon ou de combustible humide, incluant leur injection et leur pulvérisation ;
- ▶ développement de turbines à gaz naturel et à hydrogène.

Oxy-combustion

Ce mode de combustion est déjà utilisé dans quelques applications verrières. Il s'agit d'étudier la combustion de charbon pulvérisé ou en lits fluidisés dans l'oxygène dilué par des fumées (CO₂ recyclé à 300°C environ). Le diluant (CO₂) modifie la vitesse de flamme et la cinétique de combustion.

Combustion avec de forts taux de dilution dans des produits de combustion

- ▶ utilisation de mélanges pauvres en combustible afin de réduire la température dans les chambres de combustion ; la combustion devient instable. Une meilleure connaissance des phénomènes de cinétique chimique et d'interaction chimie/turbulence reste nécessaire ;
- ▶ combustion de réactifs fortement dilués (typiquement facteur 3 à 4) dans des produits de combustion, principalement le CO₂. Les températures chutent, ce qui réduit fortement la formation de polluants à haute température. De nouvelles problématiques apparaissent : la thermodynamique et la cinétique chimique de combustion sont modifiées ou décalées, les temps caractéristiques de la chimie devenant du même ordre de grandeur que ceux de la turbulence (modèles de combustion turbulente et validations expérimentales).

Micro-brûleurs

Il s'agit d'obtenir un système de petite dimension, capable d'alimenter en énergie un fantassin, un téléphone, etc. Aux difficultés technologiques (fabrication d'une micro-turbine, conversion de la chaleur en électricité) s'ajoutent des problèmes de pertes thermiques (extinction), de transferts aux petites échelles.

Sécurité des installations

L'utilisation programmée de l'hydrogène devra rapprocher les communautés de combustion et de détonique pour évaluer et diminuer les risques. Les problématiques sont liées à la compréhension de la dynamique et de la stabilité des flammes multicombustibles, à la mise au point de schémas de cinétique chimique plus performants, au développement de modèles de combustion turbulente, mono ou diphasique, à une meilleure connaissance des phénomènes de transfert et de thermo-acoustique, et enfin à la mise au point de diagnostics appropriés.

Biomasse

Le plus gros émetteur de GES est le secteur des transports qui dépend actuellement à 98 % des combustibles d'origine fossile. Une directive européenne, qu'il faudra satisfaire, stipule que la part de biocarburants dans les carburants doit être portée à 5,75 % en 2008, puis à 7 % en 2010. Le potentiel de biomasse mobilisable pour la production d'énergie et de bioproduits est estimé en France à environ 30 Mtep, soit environ la moitié des besoins pour les transports.

Ainsi, la biomasse représente un potentiel important pour la production d'énergie (transport, mais aussi électricité et chaleur) ainsi que pour la fabrication de matériaux et produits dérivés. Dans le domaine de l'énergie, la biomasse (bois, déchets forestiers, taillis, céréales, oléagineux, betterave sucrière, canne à sucre, fruits, paille, mélange charbon pulvérisé/biomasse, déchets agricoles, biogaz de décharges) peut être consommée directement dans une chaudière ou une turbine à gaz. Cependant, pour des raisons environnementales, la valorisation énergétique de la biomasse devra s'effectuer après transformation par des voies biologique ou thermochimique (pyrolyse ou gazéification), pour la préparation de biocarburants, d'H₂, etc. Pour cela, des recherches fondamentales devront être menées pour optimiser les procédés de transformation actuellement retenus et pour initier de nouvelles voies de recherches innovantes et prospectives.

Les potentiels énergétiques de la biomasse ont été identifiés pour produire, entre autres, des biocarburants de première génération (huiles dans les moteurs, foyers à bois, etc.) et le chauffage résidentiel. Cette ressource naturelle bénéficie d'une haute considération vis-à-vis des écologistes et des populations, mais son utilisation directe induit des effets néfastes sur l'environnement qui sont souvent ignorés (formation de goudrons, particules, dioxines, etc.). Aussi, dans les années futures, la biomasse devra être préférentiellement transformée avant son utilisation par voies biologique et/ou thermochimique.

Voie thermochimique

Les procédés de pyrolyse ou gazéification sont actuellement étudiés pour produire un gaz de synthèse (CO et H₂ pour la fabrication de biocarburants de seconde génération par synthèse Fisher-Tropsch), des huiles de pyrolyse, du charbon de bois. Pour optimiser ces procédés en fonction du type d'utilisation recherchée, des traitements nouveaux, souvent complexes et exigeant une technologie avancée, doivent être mis au point. Il est d'ailleurs admis que dans ce domaine la France a un retard important à combler vis-à-vis des autres pays européens.

Les axes de recherche identifiés comprennent :

- ▶ l'évaluation des ressources en biomasse en prenant en compte son impact environnemental sur la surface cultivée et la modification des génomes pour optimiser le rapport CO/H₂ au vu de l'utilisation désirée ;
- ▶ la conversion de la biomasse lignocellulosique par voie thermochimique ou microbienne ;
- ▶ la production biologique de méthane et d'hydrogène ;
- ▶ la production de lipides biocarburants, huiles ;

- ▶ les procédés de traitement ou co-traitement organiques ou de bioproduits dans des systèmes bioénergétiques intégrés.

Les pistes non couvertes explicitement par le programme de l'ANR peuvent se répartir en huit points principaux.

Amélioration des connaissances physicochimiques

- ▶ biomasse et ses principaux constituants (cellulose, lignine, hémicellulose) ; ses produits de dégradation thermique (charbon de bois, huiles, goudrons, gaz) ;
- ▶ développement de schémas cinétiques pour la décomposition thermique, les mécanismes actuels étant incomplets ou mal validés. Un interfaçage est également nécessaire entre les schémas cinétiques utilisés pour modéliser la pyrolyse et la gazéification ;
- ▶ rôle catalytique des inorganiques présents ou rajoutés à la biomasse lors des procédés thermochimiques ;
- ▶ corrélation entre la nature et la composition de la ressource et sa réactivité à haute température ;
- ▶ mécanismes conduisant à la formation des aérosols. Leur piégeage reste à optimiser.

Conception et développement de nouveaux concepts de réacteurs spécifiques à la biomasse

- ▶ réacteurs multifonctionnels spécifiques ;
- ▶ procédés flexibles pouvant s'adapter à une ressource possédant des propriétés physicochimiques variables ;
- ▶ procédés sélectifs en fonction de l'application escomptée (production de H₂, de gaz pour une synthèse Fisher-Tropsch, d'huiles, etc.) ;
- ▶ procédés en conditions supercritiques ; hydrolyse ; procédés allothermiques innovants (solaire, etc.).

Densification pour le transport de la biomasse

Recherche de voies innovantes de densification pour limiter les coûts de transports et de stockages.

Devenir des inorganiques

Traçage de l'évolution des produits inorganiques tout au long du procédé et du piégeage de manière efficace.

Huiles de pyrolyse rapide

- ▶ il est nécessaire de mieux connaître les relations entre composition et propriétés d'usage ;
- ▶ amélioration de l'analyse fine des huiles et recherche de procédés d'hydrogénation.

Tenue de matériaux

Nombreux problèmes de corrosion et de tenue en température du réacteur à étudier.

Modélisation

- ▶ consommation des grains de biomasse en prenant en compte la compétition entre chimie et phénomènes de transfert. Ces modèles devront être extrapolables ;
- ▶ modélisation et dimensionnement de réacteurs polyphasiques à haute température ;

- ▶ interfaçage entre modèles de grains et modèles de réacteurs ;
- ▶ mise au point d'outils de simulation dédiés aux procédés de thermoconversion de la biomasse.

Métrologie en conditions extrêmes

Les procédés thermochimiques s'effectuant à hautes températures, avec des réacteurs à courts temps de séjour et souvent pour des faibles granulométries, le développement de métrologies adaptées reste indispensable.

Voie biologique

En France, l'approvisionnement en bioéthanol et biodiesel est actuellement insuffisant ; de nouvelles filières à partir de substrats lignocellulosiques et de nouvelles voies de production de lipides doivent être trouvées. De plus, afin de limiter les coûts globaux, la plante entière doit être valorisée, d'où l'introduction du concept de bioraffinerie et la transformation de la biomasse lignocellulosique à la fois par les voies sèches et humides. Cette dernière doit également conduire à la production d'hydrogène et à la valorisation de co-produits (levures, aliments, lipides, glycérol).

La production de biocarburants devrait permettre dans un court terme (2010) de pouvoir satisfaire la demande liée à la réglementation européenne. De sérieux progrès sont toujours réalisables en termes de création/développement d'enzymes et de microorganismes de performance pour rendre les procédés encore plus compétitifs et intensifiés. Cette voie biologique se développe non exclusivement vers la fabrication de biocarburants, mais le critère de sélection restera le coût de la filière. Pour cet axe de recherche, soutenu par le PNRB, de nombreuses pistes de recherche amont subsistent.

Amélioration du rendement (biocarburants/hectare) avec une meilleure connaissance de la physiologie et de la génomique

- ▶ de variétés de plantes hyperaccumulatrices de sucres, d'amidon ou de lipides (vigne, canne à sucre, betterave, blé, maïs, colza, tournesol) ;
- ▶ de plantes pluriannuelles à haut rendement (*Miscanthus*, *Arabidopsis*, *Jatropha*) poussant en pays tempérés ou secs ;
- ▶ de levures plus tolérantes à l'éthanol (amélioration du rendement éthanol/sucre consommé) ;
- ▶ d'algues qui, à partir de l'énergie solaire, produisent entre 30 à 1000 fois plus de sucres ou d'huile que le blé ou le colza à l'hectare.

Devenir des sous-produits des filières énergétiques (pentoses et glycérol)

Recherche ou construction par biologie moléculaire de microorganismes convertissant le glycérol ou les pentoses en éthanol ou en lipides.

Production de bioadditifs et de carburants de 2ème génération

Conception et production par bioconversion de nouvelles molécules énergétiques (acides gras, diacides, alcools) ou d'additifs lipidiques (substituts du kérosène).

Production de biohydrogène

- ▶ physiologie et génomique des bactéries productrices d'hydrogène à partir de substrats lignocellulosiques ;

- ▶ physiologie et génomique d'algues productrices d'hydrogène à partir d'énergie solaire, d'eau et de CO₂. On peut ainsi introduire l'idée d'une bioséquestration du CO₂.

CO₂

Les changements climatiques induits par l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre risquent de bouleverser le fonctionnement des écosystèmes et l'équilibre économique des sociétés. Face à l'utilisation massive de combustibles fossiles, et en particulier du charbon, la capture du CO₂ sera l'antidote des procédés de combustion, gros producteurs de CO₂ dans le domaine des transports et de la production d'énergie. La capture du CO₂ permettra de convertir l'énergie des combustibles fossiles, actuellement les hydrocarbures liquides, le gaz naturel et le charbon en combustibles sans rejets de GES. Les procédés permettant cette capture consomment 20 à 30 % de l'énergie utile produite, son coût est donc extrêmement prohibitif et nul ne sait actuellement si ces technologies seront un jour utilisées. Les procédés identifiés rentreront inévitablement en compétition durant plusieurs années et il serait dangereux de négliger les diverses pistes. La séquestration elle-même pose des problèmes environnementaux et une acceptabilité non acquise par les populations. En conséquence, le CNRS doit être en mesure de proposer des réponses scientifiques, techniques et sociétales à toutes ces questions.

Les programmes ANR 2005 et 2006 sur le "*Captage et le Stockage du CO₂*" couvrent l'ensemble des thématiques dans le domaine. Le programme Energie du CNRS doit prendre en considération les problématiques amont, capables d'entraîner une réelle rupture technologique en évaluant des procédés non retenus par les options technologiques actuelles.

Les travaux de R&D dans le domaine visent à modifier les grandes unités de production pour qu'elles génèrent un flux de CO₂ quasiment pur à moindre coût : production d'électricité, de chaleur, d'hydrogène à partir de combustibles fossiles, cimenteries, aciéries, raffineries, production de gaz naturel. Les différents programmes doivent contribuer à la mise en œuvre d'unités de démonstration industrielle dans les domaines du captage - transport - stockage du CO₂. Le CNRS a sa place de partenaire lors de la conception, de la caractérisation et de l'exploitation des résultats obtenus sur de tels systèmes pilotes.

La communauté traitant du stockage semble déjà bien structurée en réseau ; la constitution d'un réseau sur la capture doit se poursuivre, les potentiels sont grands et les laboratoires peuvent se mobiliser rapidement.

Capture du CO₂

La conception d'un procédé de capture du CO₂ constitue un enjeu scientifique et technologique majeur, cette étape représente l'essentiel (i.e. 60 à 80 %) du coût global de la chaîne de traitement (capture/transport/séquestration). Des programmes de recherche internationaux sont principalement axés sur la capture *précombustion* (en centrale thermique du type "Integrated Gaseification Combined Cycle" (IGCC), par exemple). Cependant, au niveau national, les émissions *post-combustion*

constituent, avec les transports, la part essentielle des émissions. La problématique des émissions diffuses (automobile, chauffage résidentiel), qui fait l'objet actuellement de peu de travaux en raison de la difficulté du problème, mériterait également un examen approfondi. Des innovations pouvant mener à des ruptures technologiques et présentant une probabilité infime d'être portées par un industriel, ont été retenues :

- ▶ capture dans les domaines du résidentiel et des transports. Ce sujet exploratoire est certainement utopique mais il s'agit des deux principaux secteurs émetteurs de CO₂ ;
- ▶ activation chimique ou biologique du CO₂ pour sa valorisation (catalyse chimique, enzymatique, microorganismes, algues). Ce thème novateur a déjà été pris en considération par les spécialistes de la biomasse ;
- ▶ procédés intégrés combustion / capture ;
- ▶ physico-chimie des interactions du CO₂ en milieu liquide (formation des hydrates par exemple) et solide (procédés d'adsorption et de corrosion).

Séquestration du CO₂

Il s'agit ici de concevoir des méthodes de transport et d'utilisation ou de stockage géologique du CO₂ (le stockage océanique ne semble pas être retenu actuellement). Les thèmes retenus sont le stockage et le contrôle de l'injection du CO₂ et le suivi de son devenir à moyen et long terme. Ces études concernent les stockages on et offshore, le stockage dans les aquifères et dans les veines de charbon. Les travaux devront considérer des études génériques ou des études spécifiques pour un site. Il faudra alors évaluer à partir de résultats de laboratoire, les propriétés des sites et juger de l'impact des impuretés.

Les problématiques du stockage géologique du CO₂ induisent des études fondamentales recouvrant les domaines de la chimie, de la géologie et des matériaux, le CNRS a sa place dans cette structuration interdisciplinaire de la recherche.

GAT "Efficacité énergétique" (André Lallemand)

La mise en place de ce GAT fait suite à une restructuration des GAT du programme au printemps 2004. Ainsi, on peut admettre que ce GAT a eu pour mission de poursuivre, pour l'essentiel, les travaux de l'ancien GAT "Production, transport et stockage de la chaleur et du froid", mais également celui du GAT "Energétique, Thermique".

Les bilans énergétiques globaux français mettent en évidence que seulement 63 % de l'énergie primaire est convertie en énergie finale et, sur cette énergie, seuls 70 % représentent l'énergie effectivement utile aux opérations humaines. C'est donc environ 55 % de l'énergie primaire consommée en France qui est inutilisée. Les pertes sont dues, pour l'essentiel, aux conversions des diverses formes d'énergie, à leur transport, à la façon dont elles sont utilisées. Parmi les formes d'énergie, l'énergie thermique joue un rôle prépondérant car elle intervient dans tous les processus, soit directement et positivement, soit indirectement dans les pertes. L'enjeu d'une maîtrise de la conversion, du transfert, du stockage et du transport de l'énergie thermique est donc considérable. Mais le domaine est vaste et les systèmes

impliqués sont très diversifiés, souvent anciens quant à leurs principes scientifiques et basés sur des technologies, qui pour certaines sont en évolution, pour d'autres à transformer ou à optimiser.

L'amélioration de l'efficacité énergétique de ces processus et systèmes passe nécessairement par une remise en cause des concepts de base, par des développements scientifiques nouveaux, par des analyses interdisciplinaires nombreuses et variées (thermodynamique, thermique, chimie, matériaux, automatique, mécanique, sciences humaines, etc.) faisant appel aux compétences de nombreux laboratoires qu'il convient de rassembler dans des structures spécifiques telles que celles qui peuvent être offertes par des programmes fédérateurs.

On peut classer les actions à conduire en trois grands domaines : la conception optimisée des composants et systèmes, le transport et le stockage d'énergie thermique et enfin, la gestion optimisée du fonctionnement des systèmes.

Optimisation des composants et des systèmes

Les composants et systèmes thermiques interviennent dans la conversion de l'énergie et dans les transferts. En matière de conversion thermomécanique, si les rendements sont tributaires de la limite de Carnot, il est cependant possible d'améliorer la situation actuelle en modifiant les cycles thermodynamiques et en couplant les énergies. Le développement des cycles supercritiques nécessite de faire des études sur les échangeurs à haute température autant que sur les turbines. Dans ce domaine les verrous sont autant mécaniques et du domaine des matériaux que thermiques. Si la cogénération procède d'un principe ancien, elle doit être développée pour des faibles puissances (de l'ordre de quelques kilowatts ou dizaines de kilowatts). C'est la microcogénération qui nécessite des études basiques sur des moteurs nouveaux à flux continu comme à flux discontinu. Par exemple, dans ces machines, les frottements prennent une part importante, ce qui nécessite de travailler fortement leur aérodynamique. Les études sur les moteurs alternatifs à apport externe de chaleur, comme les moteurs de Stirling, voire d'Ericsson, doivent être intensifiées pour augmenter leurs performances grâce à une meilleure maîtrise des transferts thermiques en régime oscillant, à des récupérateurs stockeurs performants et à des concepts cinématiques nouveaux.

Pour les machines frigorifiques, les pompes à chaleur et les machines trithermes, les recherches concernent aussi bien le système basique que son interaction avec la charge. Ainsi, la recherche de fluides à faible impact sur l'effet de serre est toujours d'actualité. Les fluides recensés sont peu nombreux et présentent tous des inconvénients soit sur le plan énergétique, soit sur celui de la sécurité. Le développement de machines couplées à l'énergie solaire (à sorption notamment) nécessite de lever des verrous en ce qui concerne soit les fluides, les réactions et les corps à utiliser, soit les transferts internes. Les thermo-transformateurs, indispensables dans la récupération des rejets thermiques à bas niveaux, doivent également faire l'objet de telles études. Enfin, pour toutes ces machines, il faut améliorer la connaissance et la modélisation de leur fonctionnement hors nominal et en régime dynamique afin d'optimiser leur conception et la gestion de leur fonctionnement en relation avec des charges essentiellement variables.

Si les échangeurs de chaleur interviennent dans les systèmes de conversion, ils sont présents aussi dans de nombreux autres domaines mettant en jeu des quantités d'énergie souvent très importantes. Ainsi ce composant est particulièrement sensible en matière d'efficacité énergétique. Les échangeurs compacts étant de plus en plus privilégiés dans les applications, les recherches doivent être soutenues en ce qui concerne les études de base en matière de micro et nano thermique, d'intensification des échanges, ainsi que de distribution du fluide en entrée. Ce dernier point constitue un verrou scientifique et technologique majeur dans l'optimisation des évaporateurs notamment. En vue du développement des procédés de production d'hydrogène, de la mise en œuvre des cycles supercritiques, de l'oxy-combustion et de la cogénération à partir des PACo, SOFC par exemple, il est indispensable de soutenir des travaux sur les échangeurs à haute et très haute température. L'encrassement reste un problème industriel majeur aussi bien dans la mise en œuvre de procédés du génie chimique que de la récupération d'énergie sur des produits de combustion chargés en particules.

Enfin, un secteur prometteur en matière de gains énergétiques est celui des échangeurs multifonctionnels. Beaucoup d'études fondamentales restent à faire dans ce domaine, par essence pluridisciplinaire, tant en ce qui concerne la maîtrise des réactions chimiques locales que la mécanique des fluides des mélanges et les transferts thermiques internes.

L'intégration des systèmes en vue de leur optimisation de fonctionnement ou en cascades énergétiques pour valoriser les rejets est très certainement une source d'économies d'énergie très importante. C'est une problématique multi-échelles de temps et d'espace, voire de contraintes, qui doit dans de nombreux cas coupler au maximum l'ensemble de la chaîne : source / conversion / stockage / transport / distribution / utilisation. Outre une analyse des installations et sites potentiels, les recherches à faire dans ce domaine touchent aussi bien aux aspects socio-économiques qu'au développement de méthodes thermo-économiques d'optimisation mettant en jeu, notamment, les analyses entropiques ou exergétiques, les méthodes d'optimisation multi-critères. L'école de recherche française dans ce domaine est embryonnaire ; il faut la renforcer, lui donner un caractère très nettement pluridisciplinaire et lui fournir les moyens d'un développement fort.

Stockage et transport de la chaleur et du froid

Le stockage d'énergie est primordial dans l'utilisation des sources d'énergies intermittentes. Il s'impose également dans le cas de la micro-cogénération en raison des différences temporelles des charges thermiques et électriques. Sur un plan plus général, le stockage doit avoir un impact important dans l'optimisation du couplage fourniture d'énergie / système / utilisation, notamment par la minimisation de la taille des systèmes de conversion et leur fonctionnement au régime nominal.

Dans ce domaine, les recherches concernent en premier lieu les systèmes et matériaux stockeurs (les aspects du coût étant majeurs) pour des durées diverses et pour des niveaux de température allant de valeurs négatives (pour le froid) à des valeurs positives de haut niveau (pour les applications "solaire concentré" notamment). Elles doivent également permettre de lever un véritable verrou : celui des transferts internes au stock qui limitent trop souvent les puissances de stockage et de déstockage. Un autre verrou à lever dans le cas du stockage par chaleur latente réside dans la connaissance

instantanée de l'état énergétique du stock. Enfin, des modèles génériques de comportement du système intégré convertisseur / stock / charge doivent être développés afin d'atteindre des solutions optimisées de fonctionnement pour des situations diverses.

Si le transport et la distribution de chaleur par des réseaux permettent des gains substantiels, ils peuvent devenir indispensables dans l'optique de la capture du CO₂ ou de la génération de chaleur à partir de l'énergie nucléaire. Ils seront également intéressants dans l'optique d'un "mix énergétique" ou de la polygénération (emploi de sources d'énergies diverses, fossiles et renouvelables, production de chaleur, de froid, d'électricité). Enfin, ils deviennent la règle pour la récupération des rejets thermiques.

Le développement de nouveaux réseaux, à des échelles diverses et avec des objectifs variés (ilôtage énergétique par exemple), devra s'appuyer sur des analyses de conception optimisée mettant en œuvre des méthodes thermodynamiques, thermo-économiques et des algorithmes comme les réseaux de neurones ou les algorithmes génétiques, qui ne sont quasiment jamais utilisés actuellement pour ces applications.

D'importantes recherches doivent être poursuivies en matière de nature de fluides de transport et des transferts associés, surtout dans le domaine du froid positif et négatif. On note par exemple que les mélanges diphasiques liquide-solide à changement de phase devraient permettre des économies d'énergie de l'ordre de 20 % en matière de climatisation par unité centralisée et réseau de distribution. Pour ces systèmes également, qui peuvent comporter un stockage dynamique, l'un des verrous concerne la connaissance instantanée de l'état énergétique du mélange transporté ou stocké.

Dans certains cas, le transport sur de longues distances s'imposera. Or, le froid et la chaleur sont des vecteurs énergétiques qui ne se transportent pas actuellement avec une efficacité suffisante sur des distances supérieures à une dizaine de kilomètres. La mise en œuvre du principe d'une double conversion thermique-chimique permettrait de lever ce verrou pour atteindre des distances de l'ordre de centaines de kilomètres. On peut considérer que les travaux de recherche dans ce domaine n'en sont qu'à leurs débuts. Beaucoup reste à faire, en particulier pour fédérer des équipes capables de mener à bien les études sur un temps raisonnable.

Gestion optimisée. Contrôle - commande

Dans de nombreux secteurs, la gestion des systèmes thermiques n'est pas optimisée, soit du fait de la prise en compte d'informations erronées, soit par le principe même de la régulation, soit encore par une connaissance imparfaite des phénomènes physiques impliqués dans le système.

Pour pallier ces difficultés, il importe de mener des études sur la pertinence des capteurs et des mesures (adaptation au phénomène à gérer, potentialité à fournir des informations locales ou globales), leur fiabilité, le traitement de l'information recueillie (par exemple dans les cas faisant appel aux méthodes inverses). Il faut prévoir le développement de nouveaux capteurs "intelligents" pour la conduite de nombreuses installations.

Le lien entre le phénomène physique et l'information fournie par les capteurs passe par la modélisation. Afin d'éviter la création de modèles spécifiques à chaque système, il faut travailler à la réalisation de modèles génériques adaptés à la fois aux mesures et à la commande. Ceci nécessite, d'une part, de concevoir les modèles en fonction des mesures les plus pertinentes, d'autre part, de réduire les modèles. L'ensemble mesures-modèle devient alors un véritable outil de diagnostic de fonctionnement et de gestion optimisée.

Enfin, en matière de commande, il y a nécessité à travailler sur des algorithmes adaptés à la commande de processus non linéaires et à la gestion de systèmes qui souvent sont complexes et dans lesquels les phénomènes physiques doivent être observés et gérés sur plusieurs échelles de temps, d'espace et de paramètres divers comme la température ou la pression.

Le développement des recherches dans ce domaine nécessite le rassemblement d'équipes pluridisciplinaires (thermique, automatique, mathématiques appliquées, génie électrique, matériaux).

GAT "Nucléaire du futur" (Pascale Hennequin)

L'énergie nucléaire est un élément fondamental et incontournable dans le panorama énergétique de la France : inscrite dans la loi sur l'énergie de 2005, elle vise à garantir l'indépendance énergétique tout en répondant aux objectifs de réduction drastique des gaz à effet de serre. L'engagement français dans le domaine est sensible au travers des grands programmes (dont GENIV pour le nucléaire fission et ITER pour la fusion). Au niveau mondial, des signes clairs d'un développement annoncé du nucléaire dans les décennies à venir sont déjà présents.

Le nucléaire recouvre des domaines très divers par les thèmes scientifiques, la structuration de la recherche, le développement économique et l'impact environnemental. Ils ont cependant un dénominateur commun, qui apparaît comme singulier dans le Programme Energie : d'une part, les échelles de temps, puisque l'on se place sur le long, voire le très long terme, d'autre part, la gestion de la recherche/développement, jusqu'au prototype et la centrale éventuelle, intégrée dans des programmes nationaux, européens ou internationaux, qui sont pilotés majoritairement dans un cadre de politiques publiques.

Au-delà des applications et des problématiques d'intégration très immédiates, le développement de nouvelles filières fission ou fusion fait appel à des recherches très amont, relevant des défis scientifiques spécifiques (simulation des réacteurs, physique des plasmas, chimie des sels fondus), dont un point commun est celui des matériaux. La structure des domaines impliqués peut être très différente, avec cependant une dominante de pilotage par les grands programmes et le CEA. Une question importante est l'articulation du Programme Energie avec les programmes et organismes porteurs. La synergie avec ces programmes a un potentiel fort d'impulsion à travers les collaborations avec les laboratoires académiques. Les compétences pointues et très complémentaires de ces laboratoires sont des atouts forts pour le développement de ces programmes. Le PIE peut jouer un rôle structurant, fondamental pour la visibilité des laboratoires et leur développement propre. Le PIE, à travers ses structures de réflexion et de prospective, est à même de développer une vision stratégique

et de contribuer au pilotage des programmes. Trois lignes ou actions de prospective ont été principalement développées dans le cadre du GAT ces deux dernières années, sur lesquelles il est souhaitable de continuer l'effort :

- ▶ simulation des réacteurs et analyse des scénarii de déploiement d'une filière nucléaire durable ;
- ▶ développement et effort de structuration de la communauté académique fusion magnétique, en particulier autour d'ITER ;
- ▶ identification des problèmes communs aux filières fusion/fission : comportement des matériaux sous irradiation, modélisation, problèmes de physico-chimie, liés à l'emploi de couvertures métalliques liquides ou de sels fondus, de thermique et écoulements.

Cependant, des actions ciblées du type de l'ACI Find doivent être développées, notamment pour soutenir des collaborations naissantes. Des projets exploratoires seraient adaptés pour ces actions et renouvelleraient l'intérêt des chercheurs pour le programme. Un exemple est le développement de nouvelles sources d'ions négatifs pour l'injection d'énergie dans les plasmas de la fusion magnétique, qui fait appel à des compétences CNRS (propriétés atomiques et moléculaires de l'hydrogène et surfaces, plasmas radio-fréquence, etc.).

Du point de vue des matériaux, les recherches semblent coordonnées dans chacun des thèmes fusion et fission. Le PIE devrait servir de pont entre ces deux communautés en identifiant clairement les axes de recherches communs. Par exemple, la communauté des sels fondus pour les réacteurs au thorium participe activement à l'élaboration d'un projet de boucle de sels fondus fonctionnant à haute température (650 °C - 950 °C) et à haute vitesse d'écoulement (> 1m/s). Ce projet, qui regroupe déjà des partenaires multiples, du nucléaire ou non, pourrait être utile à la communauté fusion qui étudie l'évacuation de puissance par un caloporteur lithié. De la même façon, il peut s'avérer utile de rapprocher les deux communautés sur le thème de la tenue des matériaux sous irradiation.

En conclusion, il semble important de maintenir la thématique nucléaire du futur dans le programme Energie CNRS si celui-ci veut aborder l'ensemble des grandes questions concernant les sources d'énergie du futur. Le PIE sera utile aux deux communautés pour aider au développement de certaines actions spécifiques (GdR PACEN) et pour soutenir les études de scénarii nucléaires, qui peuvent naturellement être couplés à d'autres activités du programme (socio-économie, hydrogène, sels fondus comme caloporteur à haute température, etc.).

GAT "Socio-économie" (Pierre Matarasso)

Le volet de recherche en «socio-économie» occupe une place transversale particulière dans le programme Energie. Son principal atout est de viser à intégrer au mieux les réalités des sciences économiques, humaines et sociales, dans la recherche technologique sur l'énergie, en explorant largement les différents champs disciplinaires dans lesquels des connaissances nouvelles sont nécessaires et doivent être intégrées à celles déjà acquises. Il cherche à faire appel, selon une approche interdisciplinaire, aux recherches menées en économie et en sociologie mais aussi, de manière plus large, aux autres disciplines des sciences humaines.

Le paysage énergétique change actuellement très rapidement. La fin de «l'ère du pétrole bon marché», naguère une hypothèse controversée, se transforme peu à peu en certitude. Il en est de même du changement climatique. Même si les ressources fossiles restent abondantes et leurs conversions en hydrocarbure et les possibilités de production d'énergies sans émissions de plus en plus nombreuses, le marché de l'énergie restera affecté par les rythmes très dissociés de la croissance des besoins énergétiques, des investissements du secteur énergétique et du progrès technique aux effets encore plus lents.

Un changement de paysage va s'opérer dans le secteur de l'énergie avec un changement technique de l'importance de la révolution industrielle probablement. Si les sujets de recherche de socioéconomie demeurent, comme la prospective énergétique et les options de politique climatique, de nouveaux thèmes émergent et doivent être consolidés.

Les thèmes émergents

Prospective énergétique nationale, régionale, locale

- ▶ prospectives régionales et locales en termes de systèmes énergétiques durables avec recherches sur une intégration offre/demande d'énergies : contextes des pays industriels et des pays en développement, des villes et du monde rural ;
- ▶ villes et énergies, « écologies urbaines » ;
- ▶ retour du thème de la maîtrise de la demande, avec apparition de technologies nouvelles et leur diffusion (lampes LED, super-isolants, moteurs hybrides, etc.), et diffusion de l'approche d'optimisation des systèmes énergétiques ;
- ▶ prospectives énergétiques et évaluation environnementale à différents niveaux : secteurs économiques, filières énergétiques et Analyses de Cycle de Vie (hydrogène, biocarburants).

Obstacles institutionnels organisationnels et sociaux vers une économie à bas profil énergétique

- ▶ cas des bâtiments à faible consommation d'énergie : paniers de technologies et adaptation à l'usage (isolation, pompes à chaleur, récupération de rejets thermiques, etc.) ; problèmes de «savoir-faire système» pour les architectes, les installateurs ; obstacles aux projets de réhabilitation énergétique des bâtiments (structures de propriété, réglementations, adaptation des dispositifs d'aide et de suivi) ;
- ▶ cas des transports : systèmes de transports et partages modaux, nouvelles mobilités ;
- ▶ acceptabilité de nouvelles productions d'énergie primaire (éolienne, séquestration, biocarburants, etc.) ;
- ▶ acceptabilité de réglementations (limitations de vitesses, accords volontaires des constructeurs d'automobiles, etc.).

Les axes thématiques à proposer

Analyse des systèmes énergétiques et modélisation

Il existe en France des compétences importantes mais dispersées en modélisations techniques et économiques des systèmes énergétiques. Le regroupement de ces compétences peut être l'occasion de

réunir une masse critique pouvant servir de socle à de très nombreuses recherches en socio-économie sur les dynamiques économiques, urbaines, technologiques, et d'innovation par la mise en place de la compréhension des aspects systémiques des questions énergétiques. La socio-économie pourra ainsi bénéficier d'une coordination des expertises sur les systèmes énergétiques et de l'apport d'une information factuelle essentielle sur les dimensions techniques.

Il existe beaucoup de points de contact entre les différentes modélisations, par delà les différences d'objets (descriptions technologiques, traitement des courbes de charges, stockage, développements coopératifs, etc.). Par ailleurs ces modélisations constituent une ouverture méthodologique et en termes de données pour l'Analyse de Cycle de Vie.

Innovations techniques, institutionnelles, réglementaires et comportementales

Le secteur de l'énergie se trouve soumis à un ensemble d'innovations sur tous les plans (techniques, réglementaires, économiques, comportementaux, etc.). Le modèle des énergies centralisées, associées à de grands réseaux et souvent à des monopoles nationaux, est mis en question avec la libéralisation des marchés énergétiques et la diffusion d'innovations techniques (éolien, microturbines, LED, véhicules hybrides, nouvelles modalités de transports, etc.). Les politiques climatiques cherchent à provoquer un pivotement des systèmes techniques.

Les sciences humaines sont concernées par les interactions de la réglementation, de la technique et des secousses des marchés de l'énergie qui nous acheminent lentement mais sûrement vers des sociétés qui seront probablement assez différentes de celles que nous connaissons. Économistes, juristes, sociologues doivent contribuer à la compréhension des transformations en cours, mais aussi à localiser des marges d'action des politiques publiques, en particulier dans la compréhension des obstacles à la diffusion d'innovations.

L'énergie dans le développement humain et social

L'énergie ouvre rapidement sur le thème de l'organisation de la «vie matérielle» dont parlait Fernand Braudel. Elle constitue un des éléments les plus structurants autant au niveau de l'espace que de la division du travail des sociétés modernes ou plus anciennes. Mais les méthodes utilisées pour décrire et caractériser les systèmes énergétiques ainsi que leur insertion dans l'économie et dans les institutions peuvent être étendues et surtout enrichies par des travaux portant sur «des sociétés passées ou éloignées». A ce titre on pourrait citer de nombreux sujets de l'histoire de l'énergie, des institutions et des organisations de l'espace qui lui sont associées. On citera aussi le passage de sociétés fondées sur les énergies renouvelables (bois de feu, travail humain, animaux de trait, etc.) à des sociétés qui incorporent progressivement des énergies plus techniques (pompage solaire, photopiles, petits groupes diesel), thème important dans les pays en développement où cette transition n'est pas achevée et où coexistent des systèmes traditionnels et modernes. Géographes, anthropologues et historiens ont beaucoup à dire sur ces transitions.

La thématique énergie et urbanisation rapide dans ces mêmes pays soulève de nombreuses questions qui renvoient aux enjeux des politiques climatiques, de même que des questions liées à l'acceptabilité

et à la modification des paysages : introduction de l'éolien en milieu rural, effet des grands barrages, transformation de l'apparence des bâtiments par la rénovation énergétique.

Comment mieux impulser au CNRS une recherche sur l'énergie dans le domaine des SHS ?

La recherche en SHS sur les problèmes énergétiques est réalisée par une communauté de recherche très clairsemée. La mobilisation sur ce thème ne peut se faire qu'au « coup par coup ». Il faut construire sur le long terme une communauté basée sur trois piliers :

- ▶ un fondement méthodologique solide élaboré en commun avec les technologues et les ingénieurs spécialisés dans le domaine de l'énergie pour mettre en place une recherche sur le futur des sociétés industrielles ou en développement. C'est le thème de la prospective, de la modélisation et de leurs déclinaisons ;
- ▶ en second lieu pour les sciences humaines préoccupées du « présent » (économie, sciences juridiques, sciences politiques, gestion), une analyse des innovations technologiques, des obstacles qui leurs sont liés et des instruments de politique publique (réglementations, incitations, etc.) dans leur contexte large (libéralisation des marchés de l'énergie, géopolitiques des marchés de l'énergie) ;
- ▶ enfin, sachant que l'énergie et les systèmes énergétiques ont toujours constitué un défi pour toutes les sociétés humaines et qu'elles constituent un accès à la compréhension des sociétés actuelles ou passées, les sciences humaines «fondamentales» (anthropologie, histoire, géographie, archéologie) devraient être mobilisées pour des analyses historiques visant à éclairer les choix futurs.

Construction des communautés

On se proposerait de réunir chaque communauté environ deux fois par an dans le cadre de :

- ▶ un «atelier projet» au cours duquel seraient présentés des projets articulant méthodologies, études de terrain et recueil de données pouvant servir de base à des soumissions ou suggestions à l'ANR ou au niveau européen. Il s'agit de faire reconnaître des sujets qui n'ont pas encore émergé ;
- ▶ un séminaire «recherches et fondements», qui aurait pour fonction de donner naissance à une publication sous forme d'ouvrage présentant des expériences diversifiées ou des généralisations méthodologiques.



Conclusion

La maîtrise de la demande future d'énergie et des conditions d'approvisionnement, qui évoluent avec la raréfaction des énergies fossiles, constitue un enjeu politique majeur pour l'ensemble de la planète. Cette problématique se place dans un contexte, d'une part, de changement climatique engendré par les rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, d'autre part, de croissance économique et démographique de certains pays en voie de développement conduisant vers une demande accrue d'énergie.

C'est donc dans le cadre de la problématique de l'environnement, mais aussi du développement durable, que les défis énergétiques doivent être relevés. La mise en place d'une instance ou structure de coordination de ces recherches sur les énergies durables et acceptables est apparue comme nécessaire. Au-delà de ses relations avec les industriels, elle doit s'intégrer dans la politique européenne, y faisant apparaître la vision du problème énergétique national, tout en participant à des actions communes. Pour la mise en œuvre de ces recherches, une approche multidisciplinaire conjuguant les dimensions scientifiques, la dimension sociale, la dimension économique et la dimension environnementale s'est imposée. Le CNRS, organisme de recherche regroupant l'ensemble de ces disciplines, a donc tous les atouts pour se positionner sur ce terrain. Il s'est engagé sur cette voie au travers du Programme Interdisciplinaire Energie, qui s'est déroulé sur quatre ans, de 2002 à 2006.

Durant le déroulement du Programme, les travaux des Groupes d'Analyse Thématiques ont permis d'amplifier la structuration d'une communauté pérenne. Une de leurs principales activités a été de mener des études prospectives propres à chaque thème et d'en identifier les verrous scientifiques. Ainsi, ils ont défini les recherches à développer à différents horizons et ils ont recensé les acteurs potentiels de ces actions. Leur mission a aussi permis de jouer le rôle d'interface avec les différents organismes de recherche, les réseaux, les programmes, les GDR, etc. Au cours de ces années, de nombreux séminaires ont été organisés dans le cadre du programme par les coordonnateurs des GAT, soit une moyenne de deux par an environ. Les GAT ont aussi contribué aux travaux de l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologique, qui font l'objet du rapport établi par les sénateurs P. Laffitte et C. Saunier : "Changement climatique, transition énergétique : dépasser la crise".

Les projets mis en place par le Programme pour 2 ou 3 ans sont pour la plupart terminés ; cependant, certains lancés en 2004 ne prendront fin qu'en novembre 2007. Ainsi, le Programme Energie, qui a débuté en 2002, est pratiquement achevé. Il s'est traduit par une collaboration scientifique multidisciplinaire entre des chercheurs de différents départements du CNRS ou universitaires, comme en témoigne bon nombre de projets. La réussite du Programme actuel relève de la participation de 256 équipes, réparties dans 136 laboratoires, ce qui représente environ 935 chercheurs. Pour les projets terminés en 2004, 2005 et 2006, la production scientifique est riche, elle correspond à 189 articles de revues, 370 communications dans des congrès et 11 brevets. Ces chiffres sont en dessous de la réalité car les publications en matière d'articles de revues nécessitent souvent des délais longs, et ils ne

prennent pas en compte la production scientifique des 18 projets non terminés. Ces travaux sont à l'origine d'avancées scientifiques et technologiques significatives dans différents domaines.

L'une des richesses du Programme est la pluridisciplinarité associant des recherches à caractère scientifique avec des recherches économiques et sociologiques, appliquées aux questions d'offre et de demande d'énergie. Cette pluridisciplinarité a occupé une place forte au sein du Programme et elle s'est traduite par la collaboration d'équipes d'origines diverses pour les trois/quarts des projets. Ceci constitue un véritable creuset de connaissances propres à faire émerger des innovations.

Les cinq Colloques "Energie", organisés durant ces quatre années du programme, ont constitué des lieux de discussions privilégiées et de convivialité pour les différents acteurs du Programme. Ils ont permis d'amplifier les contacts entre chercheurs de disciplines différentes. Au cours de ces colloques, les grandes lignes directrices en matière de prospective dans les différents domaines des GAT ont pu être portées à la connaissance de tous (une moyenne de 130 participants par Colloque). En particulier, ces échanges ont été très utiles pour la soumission de projets dans le cadre des Programmes de l'ANR. C'est pourquoi un certain nombre des projets du Programme ont trouvé un prolongement dans ce cadre.

Il est très encourageant de voir que ce Programme Energie se poursuit sous la direction de Jean-Bernard Saulnier. Dans une première phase, il a recueilli le point de vue des Directeurs scientifiques des différents Départements du CNRS. La seconde phase a eu pour objectif de définir les grandes orientations à retenir pour le programme. L'ensemble des travaux du Programme, en particulier ceux des GAT, a servi de base à la tenue d'un Séminaire de préparation de la poursuite du Programme Energie, qui a eu lieu à Cachan le 26 juin 2006. Le séminaire de Cachan a permis d'établir les grandes lignes directrices du futur Programme, en collaboration avec des partenaires industriels et institutionnels.

En conclusion, 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.

Si nos connaissances actuelles guident ces réflexions et éléments stratégiques, permettant la mise en place de dispositifs maîtrisés ou maîtrisables sans risquer de mettre à mal notre équilibre socio-économique, la vision à plus long terme doit être abordée dès aujourd'hui, bien qu'elle ne s'appuie que sur nos capacités actuelles. En plus des recherches sur des concepts identifiés, il faut consentir des efforts importants sur de nouveaux concepts ou sur la recherche de ruptures. Enfin, pour faire progresser efficacement la recherche, il apparaît comme nécessaire d'avoir des actions coordonnées au niveau gouvernemental avec une politique scientifique et technique bien identifiée.

Annexes



Annexe 1

Le livre blanc : «Une politique de recherche et développement pour des énergies durables»

Annexe 2

Liste des projets de recherche

Annexe 3

Rapports d'activités des projets de recherche

Annexe 4

Laboratoires impliqués dans les thématiques des GAT

Annexe 5

Rapports d'activités des GAT



Annexe 1

Livre Blanc : «Une politique de recherche et développement pour des énergies durables»

Consultable sur le CD-ROM

Annexe 2

Liste des projets

Projet		Responsable scientifique	Partenaires
PRI 1.1	Biocarburant éthanol	Goma Gérard LISBP (Toulouse)	LAAS (Toulouse) - BIP (Marseille) LEAPS Univ Aix-Marseille (Aix en Provence) INRA (Montpellier) - IEM (Montpellier) IGM (Orsay) - IBGC (Bordeaux)
PRI 2.1	Recherche de base en photovoltaïque	Marfaing Yves LPSC (Meudon)	LGET (Toulouse) - InESS (Strasbourg) IPCMS (Strasbourg) - POMA (Angers) Institut Lavoisier (Versailles)
PRI 3.1	Cœur de PACo à électrolyte membrane	Lamy Claude LACCO (Poitiers)	ENSEM (Nancy) - LET (Poitiers) GREMI (Orléans) - LTI (Nantes)
PRI 4.1	Production d'hydrogène par des énergies renouvelables	Legrand Jack GEPEA (St Nazaire)	CIM2 (Paris) - CEMCA (Brest) CEA/DEVN (St Paul les Durances)
PRI 4.2	Stockage d'hydrogène	Percheron Annick LCMTR (Thiais)	ICMCB (Pessac) - Institut Néel (Grenoble) LIMHP (Villetaneuse) - LIMSIS (Orsay) LPT (Orsay)
PRI 5.1	Etude des transferts d'énergie dans les réseaux	Hadj Saïd Nouredine ENSIEG (St Martin d'Hères)	L2EP (Lille)
PRI 5.2	Electronique de puissance haute tension	Sanchez Jean-Louis LAAS (Toulouse)	LAPLACE (Toulouse)
PRI 6.1	Froid solaire	Stitou Driss PROMES (Perpignan)	LESETH (Toulouse) - LET (Poitiers)
PRI 6.2	Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques thermiques au bâti	Ménézo Christophe CETHIL (Villeurbanne)	LOCIE (Chambéry) - SPE (Corte) CEP-ENSMP (Paris) - LMSC (Univ Gercy Pontoise)
PRI 7.1	Production d'hydrogène par énergie solaire "Hysol"	Flamant Gilles PROMES (Odeillo)	LSGC (Nancy) - LGPSD (Albi) EM2C (Chatenay-Malabry)
PRI 8.1	Communauté d'Analyse et de Recherche des Nouvelles Orientations de la Thermodynamique	Feidt Michel LEMETA (Nancy)	CEP-ENSMP (Paris) - CETHIL (Villeurbanne) LAGIS (Villeneuve d'Ascq) - CNAM (Paris) LIMSIS (Orsay) - PROMES (Perpignan) LaTEP (Pau) - GEPEA (St Nazaire)- LSGC (Nancy)

Projet		Responsable scientifique	Partenaires
PRI 8.2	Microéchangeurs	Lallemand Monique CETHIL (Villeurbanne)	CRTBT (Grenoble) - CEA/GRETh (Grenoble) LEMETA (Nancy) - INPG (Grenoble) LTI (Nantes) - IUSTI (Marseille)
PRI 9.1	Réseaux de distribution de froid	Lallemand André CETHIL (Villeurbanne)	LaTEP (Pau) - CEMAGREF (Antony) CEA/GRETh (Grenoble) - LBHP (Paris)
PRI 9.2	Cycles thermochimiques transport chaleur et froid	Mazet Nathalie PROMES (Perpignan)	LSGC (Nancy)
PRI 10.1	Capture par adsorption de CO2 dans des gaz de centrales thermiques et leur injection en puits de pétrole	Tondeur Daniel LSGC (Nancy)	LEMETA (Nancy) - CEP-ENSMP (Paris) LTMP (Vandoeuvre les Nancy) PROMES (Perpignan)
PR1.2	Stockage d'hydrogène dans des matériaux nanostructurés	Béguin François CRMD (Orléans)	LMM (Mulhouse) - CRMC2 (Marseille) PROMES (Perpignan) - ICS (Mulhouse)
PR1.3	Stockage d'hydrogène dans les hydrures métalliques légers	Percheron Annick LCMTR (Thiais)	ICMCB (Pessac) - LC (Grenoble) LTPC - Univ Paris-Sud (Orsay) - PROMES (Perpignan)
PR1.4	Stockage d'hydrogène par adsorption	Hassouni Khaled LIMHP (Villetaneuse)	LIMSI (Orsay) - LEGI (Grenoble) PROMES (Perpignan) - FEMTO-ST (Besançon) LEMETA (Nancy)
PR1.6	Solution hybride de stockage d'hydrogène	Boubakar Lamine LMARC (Besançon)	LCMTR (Thiais) - LEMETA (Nancy)
PR1.7	Stockage du vecteur hydrogène	Flamant Gilles PROMES (Odeillo)	MSSMAT (Chatenay -Malabry) LCVN (Montpellier) - LIMHP (Villetaneuse) LTPCM (St Martin d'Hères)
PR2.1	Echangeurs multifonctionnels	Peerhossaini Hassan LTI (Nantes)	LMFA (Ecully) - CORIA (St Etienne Rouvray) LGC (Toulouse) - LEMETA (Nancy) CEA/GRETh (Grenoble)
PR2.3	Refroidissement diphasique	Gradeck Michel LEMETA (Nancy)	IRSID (Maizieres les Metz) - IMF (Toulouse) EDF (Chatou) - TU (Berlin)
PR2.4	Répartiteurs de chaleur diphasiques associés aux PEMFC	Alexandre Alain LET (Poitiers)	LEMETA (Nancy) - LE (Toulouse) CETHIL (Villeurbanne) - LAAS (Toulouse)

Projet		Responsable scientifique	Partenaires
PR2.6	Méthodes exergo-économiques pour diminuer les coûts d'investissement et de fonctionnement de systèmes énergétiques	Strub Françoise LaTEP (Pau)	LEMTA (Nancy) - CEP - ENSMP (Paris) PROMES (Perpignan)
PR2.8 PRI9.2	Cycles thermochimiques pour le transport de chaleur et froid à longues distances	Mazet Nathalie PROMES (Perpignan)	LOCIE (Chambéry) - LSGC (Nancy)
PR2.9	Comportement en régime variable de machines thermiques à cycle inverse	Feidt Michel LEMTA (Nancy)	LaTEP (Pau) - CEP-ENSMP (Paris) CEMAGREF (Antony) - CETHIL (Villeurbanne)
PR3.2 PRI6.2	Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques thermiques au bâti	Ménezo Christophe CETHIL (Villeurbanne)	LOCIE (Chambéry) - SPE (Corte) CEP-ENSMP (Paris) - LMSC (Univ Gercy Pontoise) - CEA/GENEC (St Paul les Durance)
PR4.1	Combustion propre dans les foyers à cycles combinés et flexible aux nouveaux combustibles	Most Jean-Michel LCD (Poitiers)	CORIA (St Etienne Rouvray) EM2C (Chatenay- Malabry) CETHIL (Villeurbanne)
PR4.3	Combustion assistée par H ₂ et radicaux générés par un plasma non thermique	Cormier Jean-Marie GREMI (Orléans)	LPGP (Orsay) - LCSR (Orléans) - LME (Orléans)
PR5.5	Combustibles issus de la gazéification de la biomasse dans les moteurs HCCI	Dagaut Philippe LCSR (Orléans)	LME (Valenciennes) - LC3 (Villeneuve d'Ascq)
PR6.1	Capacité hybride associant les électrodes de supercondensateurs avec un diélectrique à haute tension de claquage	Simon Patrice CIRIMAT (Toulouse)	LGET (Toulouse)
PR6.2	Capacités de puissance recyclables et sécurisées	Brousse Thierry LGM (Nantes)	LAMMI (Montpellier) - CIRIMAT (Toulouse)
PR6.3	Coulis d'Hydrates	Fournaison Laurence CEMAGREF (Antony)	LIMHP (Villetaneuse) - ENSTA (Paris)
PR6.6	Matériaux composites pour le stockage d'énergie à HT	Palomo del Barrio Elena LEPT (Talence)	PROMES (Perpignan) - CERTES (Créteil) LaTEP (Pau)
PR7.2	Microénergie	Hirsinger Laurent LMARC (Besançon)	TIMA (Grenoble) - LPMO (Besançon)

Projet		Responsable scientifique	Partenaires
PR8.1	Confluence des prospectives énergétique et macro-économique dans la perspective d'un développement	Ghersy Frédéric CIRED (Nogent sur Marne)	LEPII (Grenoble) - LET (Lyon)
PR8.2	Energie, Transport, Habitat, Environnement, Localisation	Raux Charles LET (Lyon)	CIRED (Nogent sur Marne) LTMU (Champs sur Marne)
PE1	Cellules photovoltaïques basées sur des polymères oxygénés du titane	Brohan Luc LCS (Nantes)	POMA (Angers)
PE2	Réseaux et stockage de l'électricité	Brunet Yves LEG (Grenoble)	CIRIMAT (Toulouse) - LEEI (Toulouse) SATIE (Cachan) - LEPMI (St Martin d'Hères)
PE3	Système électrique autonome pour la récupération de l'énergie des vagues	Clément Alain LMF - EC (Nantes)	IRCCyN (Nantes) - SATIE (Cachan)
PE5.1	Biomasse - combustion - gazéification	Most Jean-Michel LCD (Poitiers)	LSGC (Nancy)
PE5.2	Electricité verte	Percebois Jacques CREDEN (Montpellier)	CREM (Suisse)
PE5.5	Effet photovoltaïque dans un photo-plasma solaire	Flamant Gilles PROMES (Odeillo)	CPPA (Toulouse)
PE5.7	Silicium solaire	Berjoan René PROMES Odeillo	IEM (Montpellier)
PE5.8	Réacteur nucléaire fission - Retraitement du combustible	Doubre Hubert CSNSM (Orsay)	IPN (Orsay) - LPSC (Grenoble)
PE5.10	Certificats verts pour énergies renouvelables	Menanteau Philippe LEPII (Grenoble)	
ECD011	Membranes protoniques conductrices hybrides	Barboux Philippe LPMC (Palaiseau)	ICMMO (Orsay) - CEA/LIONS (Gif sur Yvette)
ECD012	Pile à combustible basse température : intégration d'un catalyseur biologique pour réduire la quantité en métal précieux	Basséguy Régine LGC (Toulouse)	LEEI (Toulouse)

Projet		Responsable scientifique	Partenaires
ECD015	Séquestration de CO ₂ à très long terme par minéralisation solide dans les réservoirs gréseux et silicatés	Bernard Dominique ICMCB (Pessac)	IPGP (Paris) - CGS (Strasbourg) TPHY-ISTEEM (Montpellier) LSCE (Gif sur Yvette) - BRGM (Orléans) LGIT (Grenoble) -LMTG (Toulouse)
ECD020	Stockage réversible de l'hydrogène par les hydroaluminates. Amélioration des vitesses d'absorption -désorption par action catalytique	Bonnetot Bernard LMI (Villeurbanne)	LCMTR (Thiais) - IRC (Villeurbanne) CRMHT (Orléans)
ECD023	Elaboration de piles à combustible à membrane échangeuse de protons par voie plasma	Brault Pascal GREMI (Orléans)	IEM (Montpellier) - LACCO (Poitiers)
ECD027	Nouvelle génération d'électrolytes microstructurés et de cathodes pour les piles à combustible à oxyde solide	Cassir Michel LECA (Paris)	CIRIMAT (Toulouse) - ICMCB (Pessac) LSGC (Nancy) - LPMG-ENSM (St Etienne)
ECD032	Système électrique autonome pour la récupération de l'énergie des vagues	Clément Alain LMF (Nantes)	IRRCyN (Nantes) - SATIE (Cachan)
ECD034	Filières innovantes pour un nucléaire durable	David Sylvain IPN (Orsay)	SUBATECH (Nantes) - LPC (Caen) LPSC (Grenoble)
ECD037	Conversion photovoltaïque organique : de la production au traitement de l'énergie	Destruel Pierre LGET (Toulouse)	LAAS (Toulouse) - CRPP (Pessac) IPCMS (Strasbourg)
ECD056	Caractérisation, modélisation, simulation de la combustion de mélanges d'hydrocarbures enrichis en hydrogène pour des applications turbines à gaz	Gokalp Iskender LCSR (Orléans)	CORIA (St Etienne Rouvray) - LCD (Poitiers) EM2C (Chatenay-Malabry)
ECD059	Procédés de Capture Post-combustion du dioxyde de carbone	Grevillot Georges LSGC (Nancy)	IPGP (Paris) - CEP-ENSMP (Paris) LIMSAG (Dijon)

Projet		Responsable scientifique	Partenaires
ECD071	Matériaux membranaires pour la production d'hydrogène par électrolyse de la vapeur fournie par un réacteur HTR	Julbe Anne IEM (Montpellier)	ICMCB (Pessac) - LISE (Paris)
ECD075	Mise au point et étude d'un frigoporteur diphasique à température positive utilisable en climatisation. Propriétés de transport et stockage	Lallemant André CETHIL (Villeurbanne)	LaTEP (Pau) - CEA/GRETh (Grenoble) LBHP (Paris)
ECD079	Maîtrise de la structure, des conditions thermiques et de la réactivité pour une sélectivité donnée	Lédé Jacques LSGC (Nancy)	LSCCV (Castanet Tolosan) LMSPC (Strasbourg) - LGPSD (Albi) LCA Univ de Metz (St Avold)
ECD081	Développement et validation d'une méthodologie pour modéliser et simuler les transferts couplés convection -rayonnement-conduction dans l'habitat établissement d'un modèle physique minimal	Le Quéré Patrick LIMSI (Orsay)	LEPTAB (La Rochelle) - LET (Poitiers) EM2C (Chatenay-Malabry) LETEM (Marne la Vallée)
ECD106	Couches minces de silicium déposées à très grande vitesse pour le photovoltaïque dans l'habitat	Roca i Cabarrocas Pere LPICM (Palaiseau)	LGEP (Gif sur Yvette) LPMCN (Villeurbanne)
ECD110	Photo production d'hydrogène par la technologie de l'hydrogénase recombinante	Rousset Marc BIP (Marseille)	LEP (St Paul les Durance) - LCCP (Grenoble)
ECD124	Optimisation des transferts dans les unités fonctionnelles d'une pile à combustible	Topin Frédéric IUSTI (Marseille)	LGC (Toulouse) - CEA/GRETh (Grenoble) LE (Toulouse)
ECD127	Vieillessement du cœur de piles à combustible à membrane : causes et mécanismes	Lapicque François LSGC (Nancy)	L2ES (Belfort)

Annexe 3

Rapports d'activités des projets de recherche

Consultable sur le CD-ROM

Annexe 4

Laboratoires impliqués dans les thématiques des GAT

Laboratoires impliqués dans les thématiques du GAT 1

Laboratoire Sigle	N° Unité	Nom d'un contact	Ville	Courriel	Mots-clés				
					Production H2	Stockage H2	Piles PEMFC	Piles SOFC	Piles Systèmes
BIP	CNRS UPR 9036	Rousset M.	Marseille	rousset@ibsm.cnrs-mrs.fr	X				
CDM	ENSMP UMR 7633	Thorel A.	Evry	alain.thorel@mat.ensmp.fr				X	
CENERG	ENSMP	Achard P.	Sophia Antip	patrick.achard@ensmp.fr					X
CETHIL	CNRS UMR 5008	Chantrenne P.	Lyon	patrice.chantrenne@cethyl.insa-lyon.fr		X			
CIRIMAT	CNRS UMR 5085	Ansart F.	Toulouse	ansart@chimie.ups-tlse.fr				X	
CREE	Saint Gobain	Guizard C.	Cavaillon	christian.guizard@saint-gobain.com				X	
CRMD	CNRS UMR 6619	Beguin F.	Orléans	beguin@cnrs-orleans.fr		X			
EIFER	EDF	Gautier L.	Karlsruhe	ludmila.gautier@edf.fr			X		
EIFER	EDF	Stevens P.	Karlsruhe	philippe.stevens@edf.fr				X	
GEPEA	CNRS UMR 6144	Legrand J.	Nantes	jack.legrand@gepea.univ-nantes.fr	X				
GREEN	CNRS UMR 7037	Davat B.	Nancy	Bernard.Davat@ensem.inpl-nancy.fr					X
GREMI	CNRS UMR 6606	Brault P.	Orléans	pascal.brault@univ-orleans.fr			X		
ICMCB	CNRS UPR 9048	Bobet J.-L.	Bordeaux	bobet@icmcb-bordeaux.cnrs.fr		X			
ICMCB	CNRS UPR 9048	Grenier J.-C.	Bordeaux	grenier@icmcb-bordeaux.cnrs.fr				X	

ICSI	CNRS UPR 9069	Vix(Guterl) C.	Mulhouse	Cathie.Vix@uha.fr		X			
IEM	CNRS UMR 5635	Pourcelly G.	Montpellier	gerald.pourcelly@iemm.univ-montp2.fr			X		
IEM	CNRS UMR 5635	Julbe A.	Montpellier	Anne.Julbe@iemm.univ-montp2.fr				X	
IMN	CNRS UMR 6502	Joubert O.	Nantes	Olivier.Joubert@cnrs-imn.fr				X	
IRC	CNRS UPR 5401	Mirodatos C.	Lyon	claudemirodatos@catalyse.cnrs.fr	X				
IRC	CNRS UPR 5401	Perrard A.	Lyon	alain.perrard@catalyse.cnrs.fr			X		
IRC	CNRS UPR 5401	Farrusseng D.	Lyon	david.farrusseng@catalyse.cnrs.fr				X	
IUSTI	CNRS UMR 6595	Topin F.	Marseille	frederic.topin@polytech.univ-mrs.fr					X
L2ES	UTBM	Kauffmann J.-M.	Belfort	jean-marie.kauffmann@univ-fcomte.fr					X
LACCO	CNRS UMR 6503	Duprez D.	Poitiers	daniel.duprez@univ-poitiers.fr	X				
LACCO	CNRS UMR 6503	Léger J.-M.	Poitiers	jean.michel.leger@univ-poitiers.fr			X		
LACE	CNRS UMR 5634	Herrmann J.-M.	Lyon	jean-marie.herrmann@univ-lyon1.fr	X				
LACE	CNRS UMR 5634	Vernoux P.	Lyon	philippe.vernoux@univ-lyon1.fr				X	
LADIR	CNRS UMR 7075	Colomban P.	Thiais	Philippe.Colomban@glvt-cnrs.fr				X	
LAIL	CNRS UMR 8021	Bouamama B.	Lille	belkacem.bouamama@univ-lille1.fr					X
LAMMI	CNRS UMR 5072	Jones D.	Montpellier	debtoja@univ-montp2.fr			X		
LC	CNRS UPR 5031	Fruchart D.	Grenoble	daniel.fruchart@grenoble.cnrs.fr		X			
LC	CNRS UPR 5031	Odier P.	Grenoble	philippe.odier@grenoble.cnrs.fr				X	
LCCA	CEA Le Ripault	Barthet C.	Monts	christelle.barthet@cea.fr				X	
LCHH	CNRS UMR 8010	Bordes-Richard	Lille	Elisabeth.Bordes@univ-lille1.fr				X	
LCM	CNRS UMR 5076	Améduri B.	Montpellier	bruno.ameduri@enscm.fr			X		
LCMC	CNRS UMR 7574	Barboux P.	Paris	philippe-barboux@enscp.fr				X	
LCMTR	CNRS UPR 209	Percheron-Guégan A.	Thiais	apg@glvt-cnrs.fr		X			
LCP	CNRS UMR 8000	Dantzer P.	Orsay	pierre.dantzer@scmat.u-psud.fr		X			
LCPS	CNRS ESA 8012	Vannier R.-N.	Lille	vannier@ensc-lille.fr				X	
LDOF	CNRS UMR 6010	Lacorre P.	Le Mans	Philippe.lacorre@univ-lemans.fr				X	
LECA	CNRS UMR 7575	Cassir M.	Paris	michel-cassir@enscp.fr				X	

LEEI	CNRS UMR 5828	Turpin C.	Toulouse	Christophe.Turpin@leei.enseeiht.fr					X
LEG	CNRS UMR 5529	Lefevre G.	Grenoble	guillaume.lefevre@leg.ensieg.inpg.fr					X
LEMETA	CNRS UMR 7563	Didierjean S.	Nancy	sophie.didierjean@ensem.inpl-nancy.fr			X		
LEPMI	CNRS UMR 5631	Bultel Y.	Grenoble	Yann.Bultel@lepmi.inpg.fr			X		
LEPMI	CNRS UMR 5631	Chatenet M.	Grenoble	Marian.Chatenet@enseeg.inpg.fr			X		
LEPMI	CNRS UMR 5631	Sanchez J.-Y.	Grenoble	Jean-Yves.Sanchez@enseeg.inpg.fr			X		
LEPMI	CNRS UMR 5631	Siebert E.	Grenoble	Elisabeth.siebert@lepmi.inpg.fr				X	
LET	CNRS UMR 6608	Martemianov S.	Poitiers	serguei.martemianov@univ-poitiers.fr			X		
LIMHP	CNRS UPR 1311	Hassouni K.	Villetaneuse	hassouni@limhp.univ-paris13.fr		X			
LITEN	CEA	Marsacq D.	Grenoble	Marsacq@chartreuse.cea.fr			X		
LITEN	CEA	Pauchet J.	Grenoble	PAUCHETJO@chartreuse.cea.fr			X		
LITEN	CEA Grenoble	Lefebvre-Joud F	Grenoble	florence.lefevre-joud@cea.fr				X	
LMARC	CNRS UMR 6174	Boubakar L.	Besançon	lamine.boubakar@univ-fcomte.fr		X			
LMC3O	CNRS UMR 5618	Trens P.	Montpellier	philippe.trens@enscm.fr			X		
LMGP	CNRS UMR 5628	Pignard S.	Grenoble	Stephane.Pignard@inpg.fr				X	
LMI	CNRS UMR 5615	Bonnetot B.	Lyon	bernard.bonnetot@univ-lyon1.fr		X			
LMOPS	CNRS UMR 5041	Mercier R.	Lyon	mercier@lmops.cnrs.fr			X		
LMSPC	CNRS UMR 7515	Pham-Huu C.	Strasbourg	cuong.lcmc@ecpm.u-strasbg.fr			X		
LPMG	CNRS UMR 5148	Pijolat M.	Saint Etienne	mpijolat@emse.fr				X	
LRRS	CNRS UMR 5613	Caboche G.	Dijon	gilles.Caboche@u-bourgogne.fr				X	
LRS	CNRS UMR 7609	Louis C.	Paris 6	louisc@ccr.jussieu.fr		X			
LSGC	CNRS UPR 6811	Lapicque F.	Nancy	Francois.Lapicque@ensic.inpl-nancy.fr			X		
LSGS	CNRS UMR 7570	Billard A.	Nancy	alain.billard@mines.inpl-nancy.fr				X	
LTI	CNRS UMR 6607	Peerhossaini H.	Nantes	hassan.peerhossaini@polytech.univ-nantes.fr			X		
LTN	INRETS	Coquery G.	Arcueil	gerard.coquery@inrets.fr					X
PBM	CNRS UMR 6522	Langevin D.	Rouen	dominique.langevin@univ-rouen.fr			X		

PROMES	CNRS UPR 8521	Flamant G.	Perpignan	Gilles.Flamant@promes.cnrs.fr	X				
PROMES	CNRS UPR 8521	Monty C.	Perpignan	claud.monty@promes.cnrs.fr				X	
SCMF	CEA Le Ripault	Bebin P.	Monts	Philippe.Bebin@ANTIGONE.CEA.fr			X		
SPCTS	CNRS UMR 6638	Julien I.	Limoges	isabelle.julien@unilim.fr				X	
SPMS	ECP UMR 8580	Petot-Ervas G.	Chatenay-M.	gpetot@spms.ecp.fr				X	
SPRAM-CEA	CNRS UMR 5819	Gébel G.	Grenoble	ggebel@cea.fr			X		
	GDF	Hody S.	Saint Denis	stephane.hody@gazdefrance.com				X	
	DGTec	Jobert P.P.	Moirans	pierre-paul.jobert@dgtec.fr				X	
	CTI	Joulin J.-P.	Salindres	jjjoulin@ctisa.fr				X	

Laboratoires impliqués dans les thématiques du GAT 2

Laboratoire Sigle	N° Unité	Nom d'un contact	Ville	Courriel	Mots-clés				
					Silicium cristallin et amorphe	Chalcogénures en couches minces	Composés organiques	Composants de puissance	Systèmes Matériaux nanostructurés
CEF	Université	Massé G.	Perpignan	masse@univ-perp.fr		X			
CEM2		Duchemin S.	Montpellier	duchemin@cem2.univ-montp2.fr		X			
CRHEA	CNRS UPR 10	Leroux M.	Sophia- Antipolis	mathieu.leroux@crhea.cnrs.fr					X
CRPP	CNRS UPR 8641	Bock H.	Pessac	bock@crpp-bordeaux.cnrs.fr			X		
DPM	CNRS UMR 5586	Vignoli S.	Villeurbanne	Stephane.Vignoli@lpmcn.univ-lyon1.fr	X				
EM2C	CNRS UPR 288	Carminati G.	Paris	remi.carminati@em2c.ecp.fr					X
EPM	CNRS UPR 9033	Trassy C.	Grenoble	christian.trassy@grenoble.cnrs.fr	X				
GMV	CNRS UMR 6164	Bonnaud O.	Rennes	Olivier.Bonnaud@univ-rennes1.fr	X				

GREAH	EA 3220	Dakyo B.	Le Havre	brayima.dakyo@univ-lehavre.fr				X	
GREMI	CNRS UMR 6606	Boufendi L.	Orléans	Laifa.Boufendi@univ-orleans.fr	X				
ICMB	CNRS UPR 9048	Campet G.	Bordeaux	campet@icmcb-bordeaux.cnrs.fr					X
IMMO	CNRS UMR 6501	Gorgues A.	Angers	alain.gorgues@univ-angers.fr			X		
IMN	CNRS 6502	Brohan L.	Poitiers	Luc.Brohan@cnrs-imn.fr					X
InESS	CNRS UMR 7163	Muller J.C.	Strasbourg	Jean-Claude.Muller@iness.c-strasbourg.fr	X		X		
IPCMS	CNRS UMR 7504	Guillon D.	Strasbourg	daniel.guillon@ipcms.u-strasbg.fr			X		
IREM	CNRS UMR 8180	Etcheberry A.	Versailles	etcheber@chimie.uvsq.fr		X			
LAAS	CNRS UPR 8001	Alonso C.	Toulouse	alonsoc@laas.fr				X	
LAPLACE	CNRS UMR 5828	Roboam X.	Toulouse	xavier.roboam@laplace.univ-tlse.fr				X	
LCAES	CNRS UMR 7574	Jolivet J.P.	Paris	jjp@ccr.jussieu.fr					X
LCC	CNRS UPR 8241	Nierengarten JF	Toulouse	jean-francois.nierengarten@lcc-toulouse.fr			X		
LCCO	CNRS UMR 6503	Alonso-Vante N.	Poitiers	nicolas.alonso.vante@univ-poitiers.fr			X		
LCM	CNRS UMR 7610	Attias A.J.	Paris	attias@ccr.jussieu.fr			X		
LCOO	CNRS UMR 5255	Toupance T.	Bordeaux	t.toupance@ism.u-bordeaux1.fr					X
LCTMR	CNRS UPR 209	Lévy-Clément C	Thiais	levy-clement@glvt-cnrs.fr	X				
LECA	CNRS UMR 7575	Lincot D.	Paris	daniel-lincot@enscp.fr		X			
LEM	EA 2015	Glaize C.	Montpellier	lem@lem.univ-montp2.fr				X	
LEPCS	CNRS UMR 7512	Gross M.	Strasbourg	gross@chimie.u-strasbg.fr			X		
LEPMI	CNRS UMR 5631	Petit J.P.	St Martin d'Hères	Jean-Pierre.Petit@lepmi.inpg.fr			X		
LGEP	CNRS UMR 8507	Mencararaglia	Gif/Yvette	denis.mencaraglia@lgep.supelec.fr	X	X	X		
LGET	CNRS UMR 5003	Destruel P.	Toulouse	Jean-Pierre.Petit@lepmi.inpg.fr			X		
LGPPTS	ENSCP	Amouroux J.	Paris	jacques-amouroux@enscp.fr	X				
LIMBP	EA 3472	Beley M.	Metz	beley@sciences.univ-metz.fr			X		
LIMHP	CNRS UPR 1311	Znaidi L.	Paris	lamia@limhp.univ-paris13.fr		X			
LiPHT	CNRS UMR 7165	Hadziannou G.	Strasbourg	hadzii@ecpm.u-strasbg.fr			X		
LMP	CNRS UMR 6630	Straboni A.	Poitiers	alain.straboni@univ-poitiers.fr	X				

LPICM	CNRS UMR 7647	Roca i Cabarrocas P.	Palaiseau	pere.roca@polytechnique.edu	X				
LPLE	CNRS UPR 15	Froment M.	Paris	mif@ccr.jussieu.fr		X			
LPM	CNRS UMR 5511	Lémiti M.	Villeurbanne	mustapha.lemiti@insa-lyon.fr	X				
LPMC	CNRS UMR 7643	Solomon I.	Palaiseau	ionel.solomon@polytechnique.fr	X				
LPSC	CNRS UMR 8635	Ballutaud D.	Meudon	ballutau@cnrs-bellevue.fr	X				
LPSE	Univ Nantes	Kesler J.	Nantes	John.kessler@univ-nantes.fr		X			
LPST	CNRS UMR 5477	Paillard V.	Toulouse	vincent.paillard@cemes.fr	X				
LPTP	CNRS UMR 7648	Jolly J.	Palaiseau	jolly@lptp.polytechnique.fr	X				
PCP		François J.	Pau				X		
PIOM	CNRS UMR 5218	Parneix J.P.	Pessac	jean-paul.parneix@ims-bordeaux.fr			X		
POMA	CNRS UMR 6136	Nunzi J.M.	Angers	jean-michel.nunzi@univ-angers.fr			X		
PROMES	CNRS UPR 8521	Flamant G.	Odeillo	gilles.flamant@promes.cnrs.fr	X				
SPE	CNRS UMR 6134	Notton G.	Ajaccio	gilles.notton@univ-corse.fr				X	
TECSEN	CNRS UMR 6122	Martinuzzi S.	Marseille	santo.martinuzzi@univ-cezanne.fr	X				
UMOP	CNRS UMR 6172	Moliton A.	Limoges	andre.moliton@xlim.fr			X		
UTBM-GRN	CNRS UMR 5060	Gaffet E.	Belfort	eric.gaffet@utbm.fr					X

Laboratoires impliqués dans les thématiques du GAT 3

Laboratoire Sigle	N° Unité	Nom d'un contact	Ville	Courriel	Mots-clés				
					Combustion	Biomasse Voie humide	Biomasse Voie sèche	Capture CO2	Séquestration CO2
BIP	CNRS UPR 9036	Bruschi M.	Marseille	bruschi@ibsm.cnrs-mrs.fr		X			
CEA		Seiler J.M.	Grenoble	jean-marie.seiler@cea.fr			X		
CEP	CNRS FRE 2861	Bouallou C.	Paris	chakib.bouallou@ensmp.fr				X	X
CETHIL	CNRS UMR 5008	Escudie D.	Villeurbanne	dany.escudie@insa-lyon.fr	X				
Cirad-Forêts		Girard P.	Montpellier	philippe.girard@cirad.fr			X		
CNAM		Clausse M.	Paris	marc.clausse@cnam.fr				X	
CORIA	CNRS UMR 6614	Boukhalfa M	Rouen	mourad.Boukhalfa@coria.fr	X		X		
DCPR	CNRS UMR 7630	Battin-Leclerc F Billaud F.	Nancy	frederique.battin- Leclerc@ensic.inpl-nacy.fr francis.billaud@ensic.inpl-nancy.fr	X			X	
EM2C	CNRS UPR 288	Darabiha N.	Chatenay- Malabry	darabiha@em2c.ecp.fr	X				
EMAibi	CNRS UMR 2392	Salvador S.	Albi	salvador@enstimac.fr			X		
GEPEA	CNRS UMR 6144	Legrand J. Le Cloirec P	Nantes	jack.legrand@gepea.univ-nantes.fr pierre.le-cloirec@gepea.univ- nantes.fr			X		X
ICMB	CNRS UPR 9048	Bernard D.	Bordeaux	bernard@icmb.u-bordeaux.fr					X
IEM	CNRS UMR 5635	Julbe A. Sanchez J.	Montpellier	anne.julbe@iemm.univ-montp2.fr jose.sanchez@iemm.univ- montp2.fr			X		X
IPGP	CNRS UMR 7154	Bonneville	Paris	bonnevil@ipgp.jussieu.fr					X
IRC	CNRS UPR 5401	Mirodatos C. Dalmon J.A.	Villeurbanne	claud.mirodatos@catalyse.cnrs.fr dalmon@catalyse.cnrs.fr			X	X	
IUSTI	CNRS UMR 6595	Tadrist L.	Marseille	Lounes.Tadrist@polytech.univ- mrs.fr			X		

Lab Froid	CNAM	Lucas J.	Paris	lucas@cnam.fr			X		
LACCO	CNRS UMR 6503	Duprez D.	Poitiers	daniel.duprez@univ-poitiers.fr			X		
LAGEP	CNRS UMR 5007	Jallut C.	Villeurbanne	jallut@lagep.univ-lyon1.fr				X	
LBB	CNRS UMR 5504	Jouve C. Blanc P.	Toulouse	carole.jouve@insa-toulouse.fr philippe.blanc@insa-toulouse.fr		X			
LCA	Université	Weber J.V. Gruber R.	Saint-Avoid	weber@iut.univ-metz.fr ; rgruber@iut.univ-metz.fr			X		
LCD	CNRS UPR 9028	Most J.M. Rousseaux	Poitiers	jean-michel.most@lcd.ensma.fr rousseau@lcd.ensma.fr	X		X		
LCPM	CNRS UMR 6181	Neau E.	Luminy	neau@luminy.univ-mrs.fr				X	
LCSM	CNRS UMR 7555	Furdin G.	Nancy	furdin@lcsm.uhp-nancy.fr				X	
LCSR	CNRS UPR 4211	Gokalp I.	Orléans	Iskender.Gokalp@cnrs-orleans.fr	X		X		
LEMETA	CNRS UMR 7563	Feidt M.	Nancy	feidt@ensem.inpl-nancy.fr			X		
LERMAB	UMR Engref/ INRA/Univ	Zoulalian A.	Nancy	andre.zoulalian@lermab.uhp- nancy.fr	X		X		
LFC	CNRS UMR 5150	Graciaa A.	Pau	alain.graciaa@univ-pau.fr				X	
LGC	CNRS UMR 5503	Hemati M. Remigy JC.	Toulouse	Mehrdji.hemati@ensiacet.fr remigy@chimie.ups-tlse.fr			X	X	
LGPC	CNRS UMR 2214	Schweich D.	Villeurbanne	daniel.schweich@lgpc.cpe.fr			X		
LGPI	CNRS UMR 6067	Antonini G.	Compiègne	gerard.antonini@utc.fr			X		
LGPP	EA 1932	Mercadier J.	Pau	jacques.mercadier@univ-pau.fr			X		
LGPSD	CNRS UMR 2392	Salvador S.	Albi	salvador@enstimac.fr			X		
LGRE		Gilot P.	Mulhouse	patrick.gilot@uha.fr			X		
LIMSAG	CNRS UMR 5633	Guillard R.	Dijon	roger.guillard@u-bourgogne.fr				X	
LMOPS	CNRS UMR 5041	Mercier	Vernaison	mercier@lmops.cnrs.fr				X	
LMSPC	CNRS UMR 7515	Kiennemann	Strasbourg	kiennemann@chimie.u-strasbg.fr			X		
LPCTM	CEA	Seiler J.M.	Grenoble	jean-marie.seiler@cea.fr			X		
LRRS	CNRS UMR 5613	Bellat J.P.	Dijon	jean-pierre.bellat@u-bourgogne.fr				X	
LSGC	CNRS UPR 6811	Lédé J. Favre E.	Nancy	jacques.ledede@ensic.inpl-nancy.fr eric.favre@ensic.inpl-nancy.fr			X	X	
LTMP	EA 3099	Petitjean D.	Nancy	dominique.petitjean@ensic.inpl- nancy.fr			X		
MADIREL	CNRS UMR 6121	Llewellyn P.	Marseille	pllew@up.univ-mrs.fr				X	

MSMGP	CNRS UMR 6181	Ferasse JH.	Marseille	jean-henry.ferrasse@uni-u-3mrs.fr			X		
MSNM	CNRS UMR 6181	Charbit F.	Aix-Provence	francoise.charbit@univ.u-3mrs.fr		X			
PC2A	CNRS UMR 8533	Pauwels JF.	Lille	jean-francois.pauwels@univ-lille1.fr	X		X		
PROMES	CNRS UPR 8521	Py X.	Perpignan	py@univ-perp.fr			X	X	
Sc. Analyt	CNRS UMR 5180	Jose J.	Villeurbanne	jacques.jose@univ-lyon.fr				X	
SCSV	CNRS UMR 5586	Boudet A.M.	Toulouse	amboudet@scsv.ups-tlse.fr		X	X		
TPS	CNRS UMR 6003	Mayer V.	Aubere	vladimir.mayer@univ-bpclermont.fr				X	

Laboratoires impliqués dans les thématiques du GAT 4

Laboratoire Sigle	N° Unité	Nom d'un contact	Ville	Courriel	Mots-clés				
					Transferts thermiques	Machines thermiques	Echangeurs	Conversion des énergies	Optimisation des systèmes
Cemagref		Guilpart J.	Antony	jacques.guilpart@cemagref.fr	X	X	X	X	X
CETHIL	CNRS UMR 5008	Bonjour J.	Lyon	jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr	X	X	X	X	X
CORIA	CNRS UMR 6614	Ledoux M.	Rouen	michel.ledoux@coria.fr	X			X	
CRMHT	CNRS UPR 4212	Matzen G.	Orléans	matzen@cnrs-orleans.fr	X	X		X	
EM Albi	CNRS UMR 2392	Lecomte D.	Albi	didier.lecomte@enstimac.fr	X	X		X	X
EM Douai		Baudoin B.	Douai	baudoin@ensm-douai.fr	X	X	X	X	X
EM Nantes	CNRS UMR 6144	Tazerout M.	Nantes	mohand.tazerout@emn.fr	X	X	X	X	
EM Paris	FRE 2861	Clodic D. Marchio D.	Paris	denis.clodic@ensmp.fr dominique.marchio@ensmp.fr	X	X	X	X	X
EM2C	CNRS UPR 288	Candel Taine J.	Paris	jean.taine@em2c.ecp.fr sebastien.candel@em2c.ecp.fr	X			X	X
ENITIAA		Fayolle F.	Nantes	fayolle@enitiaa-nantes.fr	X				

ENSIA		Tristram R.	Massy	gilles.trystram@agroparistech.fr					X
FAST	CNRS UMR 7608	Gobin D.	Orsay	gobin@fast.u-psud.fr	X			X	
FEMTO/ CREST	CNRS UMR 6174	Nika P.	Belfort	philippe.nika@univ-fcomte.fr	X	X	X	X	
GREMI	CNRS UMR 6606	Pouvesle JM	Orléans	jean-michel.pouvesle@univ-orleans.fr	X	X		X	
GRETH		Mercier P.	Grenoble	pierre.mercier@cea.fr	X	X	X	X	X
IMFT	CNRS UMR 5502	Colin C.	Toulouse	colin@imft.fr	X			X	
INRA		Kondjoyan A	Clermont	alain.kondjoyan@clermont.inra.fr	X				
INRS		Fontaine JR.	Nancy		X			X	
IPCTS	CNRS UMR 6638	El Ganaoui	Limoges	mohammed.elganaoui@unilim.fr	X	X			
IUSTI	CNRS UMR 6595	Tadrist L.	Marseille	lounes.tadrist@polytech.univ-mrs.fr	X		X	X	X
LaTEP	Université	Dumas J.P.	Pau	jean-pierre.dumas@univ-pau.fr	X	X		X	X
LCD	CNRS UPR 9028	Most J.M.	Poitiers	jean-michel.most@ensma.fr	X			X	
LCTS	Université	Goyheneche JM.	Pessac	goyhenec@lcts.u-bordeaux1.fr	X				
LAMIH	Université	Desmet B.	Valenciennes	Bernard.Desmet@univ-valenciennes.fr	X	X		X	X
LAPLACE	CNRS UMR 5828	Miscevic M.	Toulouse	marc.miscevic@laplace.univ-tlse.fr	X				
LEEE	Université	Grossu L.	Villed'Avray	lavinia.grossu@u-paris10.fr	X				
LEGI	CNRS UMR 5512	Favre-Marinet M.	Grenoble	favre@hmg.inpg.fr	X		X		
LEMTA	CNRS UMR 7563	Feidt M.	Nancy	Michel.Feidt@ensem.inpl-nancy.fr	X	X		X	X
LEPTAB	Université	Allard F.	La Rochelle	francis.allard@univ-lr.fr	X			X	X
LERMAB	UMR Engref/ INRA/Univ	Perré P.	Nancy	patrick.perre@lermab.uhp-nancy.fr	X			X	
LET	CNRS UMR 6608	Petit D.	Poitiers	daniel.petit@let.ensma.fr	X	X		X	X
LETEE	Univ Bretagne Sud	Glouannec P	Lorient	Patrick.Glouannec@univ-ubs.fr	X			X	
LETEM		Lauriat G.	Marne la Vallée	lauriat@univ-mlv.fr	X				X
LGC	CNRS UMR 5503	Gourdon C.	Toulouse	Christophe.Gourdon@ensiacet.fr	X				X

LIMSI	CNRS UPR 3251	Le Quéré	Orsay	plq@limsi.fr	X			X	X
LME	Université	Higelin P.	Orléans	pascal.higelin@univ-orleans.fr	X	X		X	
LMP		Hennion PY.	Paris	dir.Imp@ccr.jussieu.fr	X	X		X	
LP2A	Université	Benet S.	Perpignan	benet@univ-perp.fr	X	X			X
LSGC	CNRS UPR 6811	Cachot T.	Nancy	thierry.cachot@ensic.inpl-nancy.fr	X	X	X	X	X
LTM	Univ Bourgogne	Mattéi S.	Le Creusot	s.mattei@iutlecreusot.u-bourgogne.fr	X			X	
LTI	CNRS UMR 6607	Peerhossaini H.	Nantes	hassan.peerhossaini@polytech.univ-nantes.fr	X	X	X	X	X
MEPS/MAI	CNRS UMR	Zeghmati B.	Perpignan	zeghmati@univ-perp.fr	X				
PHASE	EA 3028	Monchoux F.	Toulouse	fmonchou@cict.fr	X			X	X
Procédés Ind	CNRS UMR 6067	Antonini G.	Compiègne	antonini.gerard@utc.fr	X	X	X	X	X
PROMES	CNRS UPR 8521	Flamant G.	Odeillo	Gilles.Flamant@promes.cnrs.fr	X			X	
SystPhys Environ-	CNRS UMR 6134	Balbi J.H.	Corte	balbi@univ-corse.fr	X			X	
Thermo mécanique		Padet J.	Reims	jacques.padet@univ-reims.fr	X			X	
TREFLE	CNRS UMR 8508	Puiggali R.	Bordeaux	puiggali@enscpb.fr	X			X	X

Laboratoires impliqués dans les thématiques du GAT 5

Laboratoire Sigle	N° Unité	Nom d'un contact	Ville	Courriel	Mots-clés						
					Fission	Physique des réacteurs	Données nucléaires	Radiochimie	Fusion magnétique	Fusion inertielle	Matériaux
CELIA	CNRS UMR 5107	Gauthier J.C.	Bordeaux	gauthier@celia.u-bordeaux.fr						X	
CEN	CNRS UMR 5797	Haas B.	Bordeaux	haas@cenbg.in2p3.fr	X		X				
CERI	CNRS UPR 33	Barthe M-F.	Orléans	barthe@cnrs-orleans.fr					X		X
CP2M		Charai A.	Marseille	ahmed.charai@univ.u-3mrs.fr					X		X
CPHT	CNRS UMR 7644	Mora	Palaiseau	mora@cpht.polytechnique.fr					X	X	
CPT	CNRS UMR 6207	Lima	Marseille	lima@cpt.univ-mrs.fr					X		
GANIL	CNRS UMR 6415	Gales S.	Caen	gales@ganil.fr	X		X				
IPN	CNRS UMR 8608	David S.	Orsay	sdavid@ipno.in2p3.fr	X	X	X	X			
IPN - Lyon	CNRS UMR 5822	Chevarier A.	Lyon	a.chevarier@ipnl.in2p3.fr	X			X			
IReS	CNRS UMR 7178	Kerveno M.	Strasbourg	maelle.kerveno@ires.in2p3.fr	X		X	X			
IRMA	CNRS UMR 7501	Sonnendrücker E.	Strasbourg	sonnen@math.u-strasbg.fr					X		
IRPHE	CNRS UMR 6594	Clavin P.	Marseille	paul.clavin@irphe.univ-mrs.fr						X	
IUSTI	CNRS UMR 6595	Saurel R.	Marseille	richard.saurel@polytech.univ-mrs.fr						X	
LAC	CNRS UPR 3321	Beauche J.	Orsay	jacques.bauche@lac.u-psud.fr						X	
LCTS	CNRS UMR 5801	Martin E.	Bordeaux	martin@lcts.u-bordeaux1.fr					X		X
LIMHP	CNRS UPR 1311	Bonnin X.	Villetaneuse	bonnin@limhp.univ-paris13.fr					X		X
LIXAM	CNRS UMR	Klisnick A.	Orsay	annie.klisnick@lixam.u-psud.fr						X	
LJAD	CNRS UMR 6621	Blum J.	Nice	jblum@math.unice.fr					X		
LM3	CNRS UMR 8006	Bretheau T.	Paris	thierry.bretheau@paris.ensam.fr					X		X

LMD	CNRS UMR 8539	Farge M.	Paris	farge@lmd.ens.fr					X		
LPC	CNRS UMR 6534	Steckmeyer JC.	Caen	JeanClaude. Steckmeyer@lpc.caen.in2p3.fr	X	X	X				
LPGP	CNRS UMR 8578	Maynard G.	Orsay	gilles.maynard@pgp.u-psud.fr						X	
LPIIM	CNRS UMR 6633	Stamm R.	Marseille	roland.stamm@piim.up.univ-mrs.fr					X		
LPMIA	CNRS UMR 7040	Bertrand P.	Nancy	pierre.bertrand@lpmi.uhp-nancy.fr					X		
LPSC	CNRS UMR 5821	Loiseaux J-M.	Grenoble	jean-marie.loiseau@wanadoo.fr	X	X	X				
LPTP	CNRS UMR 7648	Hennequin P.	Palaiseau	pascale. hennequin@polytechnique.fr					X		
LSIIT	CNRS UMR 7005	Dischler J.M.	Strasbourg	dischler@lsiit.u-strasbg.fr					X		
LTPCM	CNRS UMR 5266	Missiaen J.M.	Grenoble	Jean- Michel.Missiaen@ltpcm.inpg.fr					X		X
LULI	CNRS UMR 7605	Amiranoff F.	Palaiseau	francois.amiranoff@polytechnique. fr						X	
MSN GP	CNRS UMR 6181	Schneider K.	Marseille	kschneid@L3M.univ-mrs.fr					X		
PROMES	CNRS UPR 6521	Hernandez D.	Odeillo	daniel.hernandez@promes.cnrs.fr					X		X
Subatech	CNRS UMR 6457	Kirchner D.	Nantes	Dominique.Kirchner@subatech.in2p 3.fr	X	X	X	X			

Laboratoires impliqués dans les thématiques du GAT 6

Laboratoire Sigle	N° Unité	Nom d'un contact	Ville	Courriel	Mots-clés					
					Théorie économique énergétique - Modélisation	Economie ressources énergétiques Economie industrielle	Economie de la demande d'énergie	Energie et émissions de CO ₂	Prospective technologies et innovations	Instruments économiques taxes droit de l'énergie
CIREC	CNRS UMR 8568	Matarasso P.	Nogent/ Marne	matarasso@centre-cired.fr	X	X	X	X	X	X
LEPII-EPE	CNRS UMR 5252	Criqui P.	Grenoble	patrick.criqui@upmf-grenoble.fr	X	X	X	X		X
CREDEN		Percebois	Montpellier	jacques.percebois@univ-montp1.fr	X	X			X	X
CGEMP	IFRI	Kepler J.H.	Paris	kepler@ifri.org	X	X				X
LERNA	Université	Moreaux M.	Toulouse	mmoreaux@toulouse.inra.fr	X	X		X	X	X
CERNA	ENSMP	Glachant M.	Paris	glachant@cerna.ensmp.fr		X			X	X
CEP/ ENSMP	CNRS FRE 2861	Adnot J.	Paris	jerome.adnot@ensmp.fr			X		X	
CMA	ENSMP	Maizi N.	Sophia-Anti	nadia.maizi@ensmp.fr	X		X	X		X
GRJM	Université	Glachant J.M.	Paris	jean-michel.glachant@u-psud.fr		X			X	X
ERASME	ECP	Da Costa P.	Paris	dacosta@ecp.fr	X	X				X
BETA	CNRS UMR 7522	Heraud J.A.	Strasbourg	heraud@cournot.u-strasbg.fr		X			X	X
LET	CNRS UMR 5593	Mignot D.	Lyon	mignot@entpe.fr			X	X	X	
INRETS-LVMT		Laterasse J. Madre J.L.	Champs/Mar Arcueil	jean.laterasse@enpc.fr jean-loup.madre@inrets.fr			X	X		
LTMU	CNRS UMR	Traisnel	Champs/Mar	jean-pierre.traisnel@univ-paris8.fr			X	X		

Annexe 5

Rapports d'activités des GAT

Consultable sur le CD-ROM



Direction : Monique LALLEMAND

CETHIL - INSA, 20, avenue A. Einstein - 69621 Villeurbanne cedex

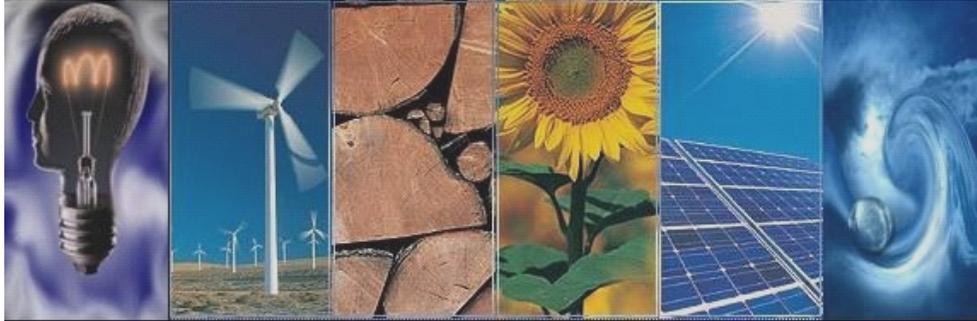
☎ : 04 72 43 81 54 - Télécopie : 04 72 43 85 22 - e-mail : monique.lallemmand@insa-lyon.fr

Secrétariat : Romie LOPEZ

Rambla de la Thermodynamique - Tecnosud - 66100 Perpignan

☎ : 04 68 55 68 55 - Télécopie : 04 68 55 68 69 - e-mail : carnot@univ-perp.fr

<http://energie.cnrs.fr/>



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
3, rue Michel-Ange - 75794 Paris cedex 16 - France
Téléphone : (33)1 44 96 40 00 / Fax : (33)1 44 96 53 90