



Colloque Energie 2004

22 - 25 novembre

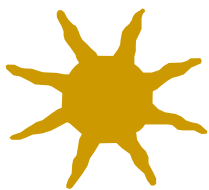
Colloque organisé par le
Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS
en relation avec les ACI Energie 2003 et 2004
Ministère de la Recherche - CNRS - DGA



et avec le concours de la
COGEMA
Etablissement de la Hague



AVANT-PROPOS	1
Les évolutions du Programme Interdisciplinaire Energie	1
LE PROGRAMME	3
LUNDI 22 NOVEMBRE	3
MARDI 23 NOVEMBRE	4
MERCREDI 24 NOVEMBRE	7
JEUDI 25 NOVEMBRE	9
CONFERENCE INVITEE	10
Eléments d'une réflexion prospective sur l'énergie au XXI ^{ème} siècle – Gérard COGNET	10
LES PROJETS DE L'ACI 2004	21
Membranes protoniques conductrices hybrides	21
Pile à combustible basse température : intégration d'un catalyseur biologique pour réduire la quantité en métal précieux	22
Séquestration de CO ₂ à très long terme par minéralisation solide dans les réservoirs gréseux et silicatés	23
Stockage réversible de l'hydrogène par les hydroaluminates. Amélioration des vitesses d'absorption - désorption par action catalytique.....	24
Elaboration de piles à combustible à membrane échangeuse de protons par voie plasma	25
Nouvelle génération d'électrolytes microstructurés et de cathodes pour les piles à combustible à oxyde solide	26
Système électrique autonome de récupération de l'énergie des vagues	27
Filières Innovantes pour un Nucléaire Durable	28
Conversion photovoltaïque organique : de la production au traitement de l'énergie	29
Caractérisation, modélisation, simulation de la combustion de mélanges d'hydrocarbures enrichis en hydrogène pour des applications turbines à gaz.....	30
Procédés de Capture Post-combustion du dioxyde de carbone	31
Matériaux membranaires pour la production d'hydrogène par électrolyse de la vapeur fournie par un réacteur HTR.	32
Mise au point et étude d'un frigoporteur diphasique à température positive utilisable en climatisation. Propriétés de transport et stockage.	33
Maîtrise de la structure, des conditions thermiques et de la réactivité pour une sélectivité donnée.	34
Développement et Validation d'une méthodologie pour modéliser et simuler les transferts thermiques couplés convection-rayonnement-conduction dans l'habitat : établissement d'un modèle physique minimal	35
Couches minces de silicium déposées à très grande vitesse pour le photovoltaïque dans l'habitat.....	36
Photo production d'hydrogène par la technologie de l'hydrogénase recombinante	37
Optimisation des transferts dans les unités fonctionnelles d'une pile à combustible	38
Vieillessement du cœur de piles à combustible à membrane : causes et mécanismes	39



Les évolutions du Programme Interdisciplinaire Energie

Après deux ans d'existence du programme Energie, les premiers résultats des actions lancées en 2002 sont nombreux et riches comme en témoignent les présentations de ce troisième Colloque Energie. Ainsi, l'année 2004 voit tout d'abord l'aboutissement des travaux des treize GAT (groupes d'analyses thématiques), groupes de réflexion qui ont couvert la majeure partie des domaines de l'énergie : nouvelles ressources énergétiques, maîtrise des vecteurs énergétiques, procédés propres, économes et performants et socio-économie. Leurs principales conclusions ont été présentées dans le livre blanc de l'Energie, intitulé " Une politique de recherche et développement pour des énergies durables". Sa diffusion a été réalisée par B. Spinner dès décembre 2003 et sa version finale sous forme de CD en mars 2004.

Les quinze PRI (projets de recherche intégrés), mis en place par le programme Energie pour deux ans en 2002, ont également pris fin. Au travers des rapports finaux, repris dans les présentations orales de ce Colloque, il apparaît que différentes avancées ont été effectuées. Ces résultats ont donné lieu à une production scientifique de 61 publications, 131 participations à des colloques et 8 brevets sont en cours de dépôts. Les résultats de ces PRI associés à ceux des neuf PE (projets exploratoires mis en place pour un an en 2003) permettront de dégager différentes perspectives, en particulier de définir les domaines déjà couverts ou les nouvelles voies stratégiques dans lesquelles des efforts de recherche doivent être consentis.

Les vingt-deux projets (mis en place en 2003) dans le cadre de l'Action Concertée Energie (MRNT-CNRS avec le soutien de la DGA) sont maintenant à mi-parcours ; leur état d'avancement, qui a fait l'objet de rapports intermédiaires, sera présenté oralement au cours de ce Colloque.

En 2004, la mise en place de nouveaux projets sur l'Energie a été réalisée dans le cadre de l' :

Action Concertée Incitative : Energie, Conception durable

qui regroupe le MR, le CNRS, la DGA et l'INRS. Les thématiques de cette ACI sont : Energie, Non-pollution / dépollution, Nouvelles méthodologies analytiques et capteurs, Eco-conception. Pour l'Energie, 59 projets ont été déposés. Le Comité Thématique Energie, auquel participe la Direction du Programme, a analysé les demandes de soutien à ces projets et, avec l'aide d'experts extérieurs qu'il a désigné, il a procédé au classement des projets. Le Comité Scientifique et le Comité de Pilotage ont retenu 19 projets pour la thématique Energie ; leurs résumés sont présentés dans ce fascicule. Ces projets ont bénéficié, en plus des allocations de recherche mises en place dans différentes Ecoles Doctorales, de 4 allocations de recherche du Ministère et de 4 Bourses de Docteurs-Ingénieurs du CNRS.

En 2004, les activités des Groupes d'Analyses Thématiques, qui ont été renouvelés, se poursuivent. Ils sont maintenant au nombre de cinq et concernent les domaines suivants : Filière Hydrogène - PACo, Bâtiment, Biomasse – Combustion - CO₂, Efficacité énergétique et Nucléaire du futur. Leur mission consiste à amplifier la structuration d'une communauté pérenne et à jouer le rôle d'interface avec les différents organismes de recherche, les réseaux, les programmes, les GDR, etc. Ils doivent cibler les recherches amont à développer pour permettre de lever des verrous précis, de définir les recherches à différents horizons et recenser les acteurs potentiels de ces actions. Le projet CARNOT (Communauté d'Analyse et de Recherche des Nouvelles Orientations de la Thermodynamique), qui réunit une vingtaine de personnes, est maintenu.

Au cours de cette dernière année, de nombreux séminaires ont eu lieu, pour la plupart organisés par les responsables de GAT, soit une moyenne de deux par an environ. Le programme Energie a soutenu l'

« Ecole Energies et Recherches ». Cette école, organisée par S. David, s'est déroulée du 21 au 26 mars à Fréjus. Elle a connu un réel succès avec la participation de 75 doctorants travaillant dans la problématique de l'énergie et environ 25 orateurs et organisateurs.

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. Ainsi, la Direction du Programme a dû être réorganisée. A côté de moi-même, Bernard Spinner, Dominique Finon et Alain Kiennemann ont été nommés Directeurs adjoints. Jean-Michel Most est Chargé de mission « Prospective européenne » afin d'analyser les programmes et les stratégies des diverses nations, et permettre une meilleure orientation de la politique de recherche du programme.

Je tiens à remercier tout particulièrement Bernard qui a mis en place et animé avec ardeur et passion un programme de grande ampleur puisqu'il réunit, pour l'ensemble des projets des trois appels d'offres, 258 équipes réparties dans 136 laboratoires ou organismes. Il a su nous communiquer son enthousiasme, sa vision de la thermodynamique et sa « culture » sur l'énergie. Bien que ne pouvant être présent à ce Colloque, il témoigne toujours d'un grand intérêt pour notre Programme et continue à y prendre une part active au travers d'analyses, de réflexions et de la définition des orientations.

Je souhaite que ce Colloque, qui est un point fort de notre activité, soit un lieu privilégié de rencontres entre les différents acteurs du programme.

Monique Lallemand

Novembre 2004

LUNDI 22 NOVEMBRE



14h
Accueil à la COGEMA
Inscriptions

15h30

Ouverture du Colloque ENERGIE 2004

M. Jean-Luc ANDRIEUX

Directeur de la COGEMA - La Hague

Mme Monique LALLEMAND

Directrice du Programme Interdisciplinaire
Energie du CNRS

« Evolution et actualités du Programme »

16h00

Conférence

M. Gérard COGNET

Chargé de mission « Prospective »

Ministère de la Recherche - MSTP

« Eléments de prospective sur l'énergie au
XXIème siècle »

17H00 : Pause

THEMATIQUE
ENERGETIQUE THERMIQUE

Présidents de séance

M. André LALLEMAND - M. Alain FERRIERE

17h20 - 18h40

GAT 9 : Gestion du froid et de la chaleur - objectifs

André LALLEMAND - CETHIL - Lyon

- **PRI 9.1 : Réseaux de distribution du froid**

André LALLEMAND - CETHIL - Lyon

- **PRI 9.2 - PR 2.8 : Cycles thermochimiques pour le transport de froid/chaleur**

Nathalie MAZET - PROMES (IMP) - Perpignan - *présenté par Lingai LUO*

- **PR 6.3 : Coulis d'hydrates**

Laurence FOURNAISON - CEMAGREF - Antony - *présenté par Anthony DELAHAYE*

- **PR 2.9 : Comportement en régime variable de machines thermiques à cycle inverse et de leurs composants**

Michel FEIDT - LEMTA - Nancy - *présenté par Rahal BOUSSEHAIN***GAT 9 : Gestion du froid et de la chaleur - synthèse**

Soirée libre

MARDI 23 NOVEMBRE

THEMATIQUE HYDROGENE

Présidents de séance

M. Claude LAMY - M. Jean-Bernard SAULNIER

8h30 - 12h

GAT 4 : Production et stockage d'hydrogène - objectifs

Annick PERCHERON GUEGAN - LCMTR - Thiais - *présenté par François BEGUIN*

- **PRI 4.1 : Production d'hydrogène par des énergies renouvelables**
Jack LEGRAND - GPEA - Nantes - *présenté par Jérémy PRUVOST*
- **PRI 4.2 : Matériaux pour le stockage de l'hydrogène**
Annick PERCHERON GUEGAN - LCMTR - Thiais - *présenté par Fermin CUEVAS*
- **PR 1.2 : Stockage d'hydrogène dans des matériaux nanostructurés**
François BEGUIN - CMRD - Orléans
- **PR 1.7 : Stockage du vecteur hydrogène**
Gilles FLAMANT - PROMES (IMP) - Odeillo
- **PR 1.3 : Stockage d'hydrogène dans les hydrures métalliques légers**
Annick PERCHERON - LCMTR - Thiais - *présenté par Fermin CUEVAS*

Pause

- **PR 1.4 : Stockage d'hydrogène par adsorption**
Khaled HASSOUNI - LIMHP - Villetaneuse - *présenté par Michel PONS*
- **PR 1.6 : Solution hybride de stockage d'hydrogène**
Lamine BOUBAKAR - LMARC - Besançon

GAT 4 : Production et stockage d'hydrogène - synthèse

GAT 3 : Piles à combustible - objectifs

Claude LAMY - LACCO - Poitiers

- **PRI 3.1 : Cœur de piles à combustible à électrolyte membrane**
Claude LAMY - LACCO - Poitiers - *présenté par François LAPICQUE*

GAT 3 : Piles à combustible - synthèse

Déjeuner

THEMATIQUE ENERGETIQUE THERMIQUE

Présidents de séance

M. André LALLEMAND - M. Michel LEBOUCHE - M. Alain FERRIERE

14h - 16h20

GAT 8 : Optimisation des échanges dans les procédés industriels - objectifs

Michel LEBOUCHE - LEMTA - Nancy

- **PRI 8.2 : Microéchangeurs**
Monique LALLEMAND - CETHIL - Lyon - *présenté par Lounès TADRIST*
- **PR 2.1 : Échangeurs multi-fonctionnels**
Hassan PEERHOSSAINI - LT - Nantes - *présenté par Dominique DELLA VALLE*
- **PR 2.4 : Répartiteurs de chaleur diphasiques associés aux PEMFC**
Alain ALEXANDRE - LET - Poitiers
- **PR 2.3 : Refroidissement par ébullition convective**
Michel GRADECK - LEMTA - Nancy
- **PRI 8.1 : Communauté d'Analyse et de Recherche des Nouvelles Orientations de la Thermodynamique (Carnot)**
Michel FEIDT - LEMTA - Nancy - *présenté par Françoise STRUB*
- **PR 2.6 : Méthodes exergo-économiques pour diminuer les coûts d'investissement et de fonctionnement de systèmes énergétiques**
Françoise STRUB - LaTEP - Pau

GAT 8 : Optimisation des échanges dans les procédés industriels - synthèse

GAT 7 : Captation de l'énergie solaire par technologie à concentration - objectifs

Alain FERRIERE - PROMES (IMP) - Odeillo

- **PRI 7.1 : Production d'hydrogène par énergie solaire**
Gilles FLAMANT - PROMES (IMP) - Odeillo
- **PR 6.6 : Matériaux composites pour le stockage d'énergie à HT**
Elena PALOMO DEL BARRIO - LEPT - Talence

GAT 7 : Captation de l'énergie solaire par technologie à concentration - synthèse

Pause



THEMATIQUE ELECTRICITE

Président de séance
M. Yves BRUNET

16h40 - 18h30

GAT 5 : Gestion de l'électricité - objectifs

Yves Brunet - LEG - Saint-Martin D'Hères

- **PRI 5.1 : Étude des transferts d'énergie dans les réseaux**
Nouredine HADJ SAID - LEG - Saint-Martin d'Hères - *présenté par Yves BRUNET*
- **PRI 5.2 : Électronique de puissance**
Jean-Louis SANCHEZ - LAAS - Toulouse - *présenté par Dominique PLANSON*
- **PE 2: Réseaux et stockage de l'électricité**
Yves BRUNET - LEG - Saint-Martin D'Hères
- **PE 3: Système électrique autonome pour la récupération de l'énergie des vagues**
Alain CLEMENT - LMF - Nantes
- **PR 6.1 : Capacité hybride associant les électrodes de supercondensateurs avec un diélectrique à haute tension de claquage**
Patrice SIMON - CIRIMAT - Toulouse - *présenté par Jean-François CAMBRONNE*
- **PR 6.2 : Capacités de puissance recyclables et sécurisées**
Thierry BROUSSE - LGM - Nantes
- **PR 7.2 : Micro-convertisseurs d'énergie mécano-électrique**
Michel LABACHELERIE - LPMO - Besançon - *présenté par Laurent HIRSINGER*

GAT 5 : Gestion de l'électricité - synthèse

Soirée libre

MERCREDI 24 NOVEMBRE

THEMATIQUE HABITAT

Présidents de séance

M. François PENOT - M. Jean-Claude MULLER

8h30 - 11h00

GAT 2 : Cellules photovoltaïques du futur - objectifs

Jean-Claude MULLER - PHASE - Strasbourg

- **PRI 2.1 : Recherches de base en photovoltaïque**
Yves MARFAING - LPSC -Meudon
- **PE 1 : Cellules photovoltaïques basées sur des polymères oxygénés du titane**
Luc BROHAN - LCS - Nantes
- **PE 5.7 : Silicium solaire**
René BERJOAN - PROMES (IMP) - Odeillo
- **PE 5.5 : Effet photovoltaïque dans un photo-plasma solaire**
Gilles FLAMANT - PROMES (IMP) - Odeillo

GAT 2 : Cellules photovoltaïques du futur - synthèse

GAT 6 : Apport des énergies renouvelables et maîtrise des échanges dans l'habitat - objectifs

François PENOT - LET - Poitiers

- **PRI 6.1 : Froid solaire**
Driss STITOU - PROMES (IMP) - Perpignan
- **PRI 6.2 : Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques thermiques au bâti**
Christophe MENEZO - CETHIL - Lyon

GAT 6 : Apport des énergies renouvelables et maîtrise des échanges dans l'habitat - synthèse

Pause

THEMATIQUE NUCLEAIRE

Présidents de séance

Mme Pascale HENNEQUIN - M. Jean-Marie LOISEAUX

11h15 - 12h00

GAT 11A : Nucléaire du futur

Jean-Marie LOISEAUX - PNC-IN2P3 - Grenoble

- **PE 5.8 : Réacteur nucléaire fission - Retraitement du combustible**
Hubert DOUBRE - CSNSM - Orsay - *présenté par Sylvain DAVID*

GAT 11B : Fusion thermonucléaire contrôlée

Pascale HENNEQUIN - Ecole Polytechnique - Palaiseau

Introduction à la visite de la COGEMA - formalités d'accès

Mme Jacqueline VANSTEELANT

Déjeuner à la maison d'Hôtes

14h - 16h
VISITE DE LA COGEMA

Pause

THEMATIQUE
COMBUSTION POUR UN ENVIRONNEMENT DURABLE

Présidents de séance
M. Jean-Michel MOST - M. Jean TAINÉ

17h00 - 19h00

GAT 1 : Biomasse pour l'énergie - objectifs

Gérard GOMA - LB-B - Toulouse - *présenté par Philippe BLANC*

- **PRI 1.1 : Biocarburant éthanol**

Gérard GOMA - LB-B - Toulouse - *présenté par Carole JOUVE*

GAT 1 : Biomasse pour l'énergie - synthèse

GAT 10 : Combustion et capture du CO2 - objectifs

Jean-Michel MOST - LCD - Poitiers

- **PR 5.5 : Combustibles issus de la gazéification de la biomasse dans les moteurs HCCI**
Philippe DAGAUT - LSCR - Orléans
- **PR 4.3 : Combustion assistée par H2 et radicaux générés par un plasma non thermique**
Jean-Marie CORMIER - GREMI - Orléans
- **PE 5.1 : Biocogaz**
Jean-Michel MOST - LCD - Poitiers
- **PR 4.1 : Combustion propre dans les foyers à cycles combinés et flexible aux nouveaux combustibles**
Jean-Michel MOST - LCD - Poitiers
- **PRI 10.1 : Capture par adsorption de CO2 dans des gaz de centrales thermiques et leur injection en puits de pétrole**
Daniel TONDEUR - LSGC - Nancy

GAT 10 : Combustion et capture du CO2 - synthèse

19h15 : départ vers Urqueville - Naqueville pour le
DINER DE GALA



JEUDI 25 NOVEMBRE

THEMATIQUE SOCIO - ECONOMIE	
Présidents de séance M. Dominique FINON - M. Pierre MATARASSO	
8h30 - 9h30	<p>GAT 12 : Socio-économie - objectifs Pierre MATARASSO - CIRED - Nogent sur Marne</p> <ul style="list-style-type: none">• PE 5.2 : Electricité verte Jacques PERCEBOIS - CREDEN - Montpellier - <i>présenté par Agnès D'ARTIGUES</i>• PE 5.10 : Certificats verts pour énergies renouvelables Philippe MENANTEAU - LEPII - Grenoble• PR 8.1 : Confluence des prospectives énergétique et macro-économique dans la perspective d'un développement Frédéric GHERSI - CIRED - Nogent sur Marne• PR 8.2 : Energie, Transport, Habitat, Environnement, Localisation Charles RAUX - LET - Lyon - <i>présenté par Jean-Pierre TRAISNEL</i> <p>GAT 12 : Socio-économie - synthèse</p>
Pause	
10h - 11h30	<p>Table ronde « Echanges sur la recherche et les innovations pour les énergies du futur » animée par M. LALLEMAND, F. YGUEL, J. TAINE, M. AMIET et les responsables de GAT : P. HENNEQUIN, A. LALLEMAND, C. LAMY, JM. MOST, F. PENOT</p>
11h30	<p>Clôture du Colloque 2004 Monique LALLEMAND</p>
12h00 : Déjeuner	

Avertissement : ce texte se fonde sur les rapports de la mission scientifique, technique et pédagogique du Ministère de la Recherche et sur le rapport de l'Académie des Technologies, Commission Energie et Environnement

INTRODUCTION

Le développement de l'humanité, dès l'origine, a été étroitement associé à la maîtrise de l'énergie sous des formes toujours plus abondantes et diversifiées ; ainsi, les démarches actuelles de réflexion et de débats portant sur le choix des options énergétiques pour le futur, sont non seulement légitimes mais indispensables alors que se manifestent les tensions sur l'offre énergétique au regard des besoins, les craintes vis-à-vis de la sécurité et de l'environnement et les interrogations sur le modèle de développement économique de notre monde.

De nos jours, le recours à des ressources de haute intensité énergétique, largement non renouvelables et très souvent polluantes, est dominant. Les perspectives de tarissement de gisements majeurs, l'observation d'impacts écologiques, voire climatiques, éventuellement irréversibles, peuvent donner le sentiment que l'Homme a atteint les limites de certains équilibres déterminants pour la préservation de son environnement terrestre. Par ailleurs, les projections donnent une population de l'ordre de 10 milliards d'êtres humains sur notre planète au milieu du siècle, avec des besoins de santé, d'alimentation et de croissance qui, traduits en énergie, seront sensiblement double de ceux d'aujourd'hui.

Il s'agit là d'un vrai défi qui requiert une solidarité dans l'espace et dans le temps car il faut :

- pouvoir assurer les besoins énergétiques tout en réduisant les impacts environnementaux,
- veiller à gérer prudemment les ressources non renouvelables par la mise en place d'une politique énergétique au niveau local, régional, national et international,

en tenant compte :

- de la nécessaire maîtrise des processus de transition entre les technologies d'aujourd'hui et celles de demain ;
- des grandes échelles de temps associées à la conception, la réalisation et l'utilisation des infrastructures énergétiques ;
- du besoin impérieux de transfert des connaissances vers les pays en voie de développement ;
- de la nécessité d'une diffusion large de l'information conduisant à une acceptabilité raisonnée par le corps social.

La situation des ressources et des systèmes énergétiques, malgré les turbulences actuelles, laissent à penser que nous resterons longtemps encore tributaires des énergies fossiles non renouvelables malgré le grave problème de production associée de gaz à effet de serre qu'il faudra capter et séquestrer.

Peut-on envisager de leur substituer des énergies renouvelables, certaines d'entre elles étant peu développées en France ?

De la réponse à cette question dépend à l'évidence l'évolution du secteur nucléaire avec le développement de nouvelles générations de réacteurs plus sûrs et de meilleurs rendements.

Dans ce contexte, quel scénario prospectif choisir pour l'énergie ?

D'un côté, le scénario de la sobriété énergétique qui, s'appuyant sur un autre type de développement, bute sur des difficultés d'ordre culturel, institutionnel et politique, avec le risque fort d'une sanction économique ; de l'autre le scénario d'une soi-disant abondance énergétique, fuite en avant, qui se fonde sur une hypothétique révolution technologique, et comporte un risque écologique majeur.

De fait, une voie médiane sera probablement suivie ; elle s'appuiera sur la mise en œuvre et la maîtrise de la plupart des options énergétiques considérées comme complémentaires. La diversification des sources et des filières apparaît de plus indispensable pour prévenir les situations de crise auxquelles nous sommes de plus en plus exposés.

On doit enfin noter que la problématique de l'énergie s'inscrit aujourd'hui dans un contexte de sociétés en mutation avec remise en cause des arbitrages entre les mécanismes du marché et les interventions publiques, la prévision globale et l'action locale, la vision du futur et la décision présente.

Le triptyque énergie-économie-environnement est désormais central et doit être appréhendé comme tel sur le plan de la recherche dans une approche pluridisciplinaire des enjeux.

La présentation ci-après se veut une contribution à une réflexion prospective pour notre pays qui s'inscrit, avec ses spécificités, dans un contexte énergétique mondial.

A partir d'une analyse des ordres de grandeur et des contraintes associées aux ressources, on identifie les pistes disponibles. Le fondement de la démarche est de caractère scientifique dans l'acceptation large du terme. En se fondant sur le diagnostic de la situation actuelle, on s'efforce de dégager des perspectives fiables à court terme, on qualifie les enjeux énergétiques pour un développement durable à l'horizon du moyen terme. A plus long terme, on envisage l'évolution des vecteurs énergétiques déjà existants ou à développer. On aborde enfin certains verrous scientifiques et technologiques qui doivent être levés pour la production et l'usage optimisés des énergies du futur sur le plan de l'efficacité, du coût et de l'impact environnemental.

1. LA SITUATION ACTUELLE N'EST PAS DURABLE

L'analyse de la situation énergétique repose en premier lieu sur une démarche rigoureuse de quantification et de qualification des ressources et des consommations mais aussi sur les conséquences qui en découlent dans une prospective dynamique. Le cas de la France est ainsi discuté et comparé dans le contexte européen et mondial.

1-1- Quelques définitions

On a l'habitude de distinguer plusieurs types de consommations d'énergie. La *consommation primaire* concerne la quantité d'énergie totale potentielle de la ressource utilisée ; elle est distincte de la *consommation finale* qui est plus faible car une partie de l'énergie primaire est perdue lors de sa transformation et de son transport. La consommation finale correspond à ce qu'achète l'utilisateur (l'essence pour un véhicule, l'électricité pour un appareil).

L'énergie se mesure ; son unité légale est le Joule, mais dans la pratique, on parle de kWh pour l'électricité et le gaz, de litre pour l'essence ou le fioul, alors que l'unité consacrée au niveau d'un pays est la tonne-équivalent-pétrole (tep). Ainsi un citoyen de la planète consomme en moyenne 1,7 tep/an, avec des disparités très importantes : 0,7 tep/an/habitant en Inde, 3,5 tep/an pour le français et plus de 8 tep/an pour un américain du nord.

Au niveau mondial, on atteint ainsi 10 Gtep/an en consommation primaire pour 6 milliards d'habitants, soit 120 000 TWh (Térawatt-heure). La consommation française primaire s'élève à 259 Mtep en 2002, à rapprocher des 162 Mtep en consommation finale et de la différence : 97 Mtep, qui traduit les pertes de raffinage, consécutives au transport et au rendement médiocre des centrales thermiques. On constate ainsi que, sur les 100 % de l'énergie primaire, 37 % sont perdus, 27 % sont utilisés dans le secteur résidentiel et le tertiaire, 20 % dans les transports, 15 % pour l'industrie et 1 % en agriculture (figure 1).

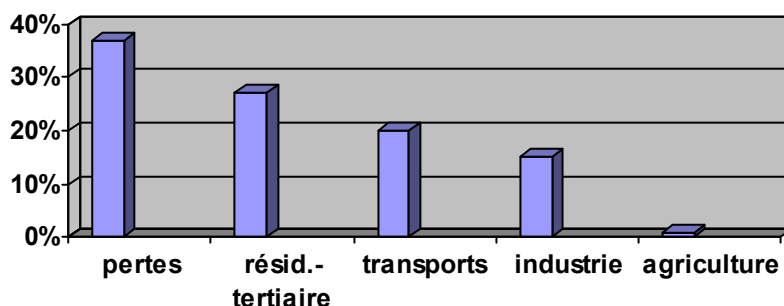


Figure 1 : Répartition de la consommation primaire en France en pourcentages (rapport MSTP)

1-2- Différentes origines et formes d'énergie

Dans la perspective du développement durable, on distingue désormais les énergies :

- non renouvelables, d'origine fossile (charbon, pétrole, gaz, uranium)
- renouvelables (hydraulique, biomasse, éolien, solaire, géothermique, marées, courants).

Les premières sont toujours exploitées en passant par la forme chaleur, utilisée comme telle ou convertie elle-même en travail et/ou en électricité.

Le rendement du passage chaleur → travail est, au mieux, celui du principe de Carnot et donc largement dépendant de la température de la source chaude. Les températures sont élevées dans les turbines à gaz ; ce n'est malheureusement pas le cas, aujourd'hui, pour les centrales nucléaires (rendement d'environ 33 %). La géothermie est aussi généralement limitée par la température. L'hydraulique et l'éolien passent directement par une forme mécanique de l'énergie ; le solaire offre le double choix de la chaleur ou de l'électricité. Au niveau mondial, la part des énergies non renouvelables dans la consommation primaire approche 90 % ; elles sont encore plus dominantes dans les pays riches où l'on atteint 94 % (93 % en France).

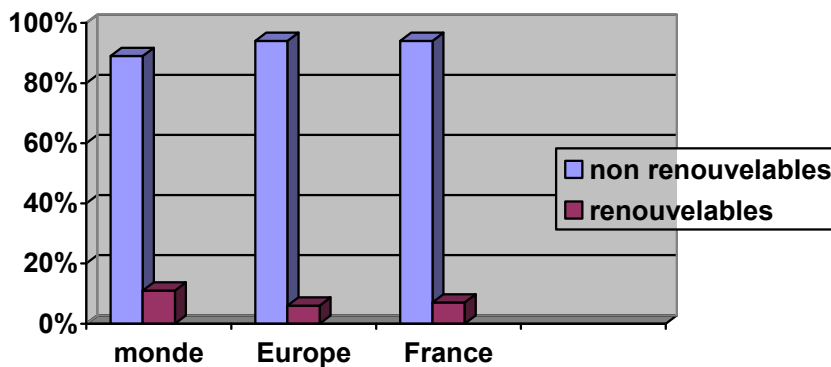


Figure 2 : Proportions relatives des énergies non renouvelables et renouvelables dans le monde, en Europe et en France. Les pourcentages concernent la consommation primaire (rapport MSTP)

Le pétrole est la source principale (38 %), ensuite le charbon et le gaz (respectivement 24 % et 22 %) ; enfin le nucléaire (7 %). Les combustibles nucléaires sont les seuls à ne pas participer à l'effet de serre. Par contre, ils posent des problèmes de déchets et de contamination (beaucoup plus limités pour le nucléaire-fusion) qu'il faut comparer aux effets de la pollution liés à la combustion des hydrocarbures et surtout du charbon.

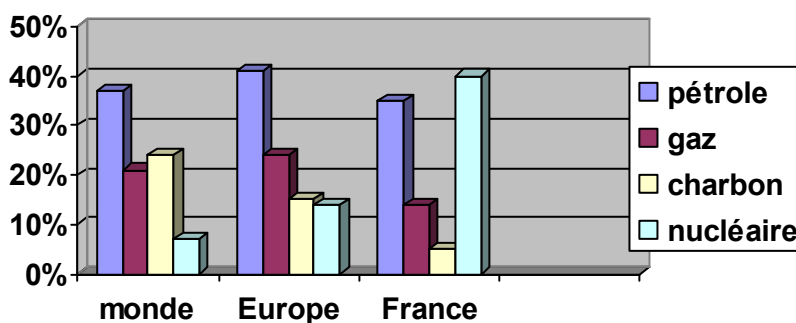


Figure 3 : Pourcentages de consommation d'énergie primaire issue du pétrole, gaz, charbon et uranium dans le monde, l'Europe et la France (rapport MSTP)

L'avantage économique majeur de tous les combustibles non renouvelables est leur coût actuel qui reste bas car ils sont disponibles en abondance, mais pour combien de temps encore ? Quelles sont les réserves prouvées et celles dites ultimes ? Quelle est la logique des marchés de l'énergie sous toutes ses formes ? Il faut noter que les réserves ultimes restent au moins stables depuis 30 ans, ce qui est surtout la conséquence d'une meilleure connaissance de la géologie globale de la planète. Cependant, le pétrole, le gaz, voire l'uranium, risquent d'être vite épuisés à l'échelle des générations humaines si on continue de les consommer au rythme actuel. Le charbon sera abondant plus longtemps, mais sa combustion est polluante et contribue à l'effet de serre. Son utilisation passera donc par des innovations technologiques (en particulier séquestration et stockage du CO₂). Les réserves d'uranium sont multipliées par 200 si l'on développe la technologie des réacteurs à neutrons rapides brûlant du U₂₃₈ à la place du U₂₃₅ brûlé dans les réacteurs à

eau pressurisée (REP). Les données les plus prometteuses concernent la fusion (réserve quasi-infinie de deutérium) ; c'est pourquoi le projet ITER constitue un enjeu majeur.

Si l'on en vient aux énergies renouvelables, l'hydraulique et la combustion de la biomasse sont actuellement nettement dominantes.

L'éolien, le géothermique et le solaire ne représentent pas 1 % de l'énergie produite aussi bien en France qu'au niveau européen ou mondial. Si l'on s'intéresse à la production d'électricité, le constat est moins sévère. La part des énergies renouvelables (EnR) pour les principaux pays européens continentaux et le Danemark est la suivante :

	France	Allemagne	Espagne	Italie	Danemark
%	14 (13)	8 (3,2)	22 (17,4)	17 (15,9)	17 (0,1)

(on distingue entre parenthèses la part de l'électricité d'origine hydraulique).

L'analyse montre qu'il est irréaliste de prévoir d'assurer une production énergétique à partir de sources majoritairement renouvelables. Les ressources hydrauliques sont presque saturées en France et en Europe ; pour l'éolien, il faudrait 25 000 éoliennes de puissance (1 MW nominal) pour couvrir 2 % des besoins français en énergie primaire ; pour la biomasse, il faudrait consacrer à des cultures dédiées le quart de la surface totale du pays pour couvrir 12 % de nos besoins totaux ; la géothermie, souvent de faible niveau de température, souffre de sa dispersion, et, même totalement mobilisée, elle ne couvrirait que 2,5 % des besoins.

Ce constat d'ensemble démontre qu'il sera bien nécessaire de cumuler toutes les EnR, mais que la part des énergies non renouvelables restera essentielle. La situation deviendra problématique si l'on persiste à compter sur le pétrole et le gaz pour assurer les besoins qui vont au niveau mondial probablement doubler d'ici le milieu du siècle. La seule énergie renouvelable capable de contribuer massivement à nos besoins est l'énergie solaire, thermique et photovoltaïque, si l'on accepte de consacrer des surfaces importantes à ce mode de production. Pour les non renouvelables, seul le charbon et l'uranium dépasseront la fin du siècle. De nouvelles ressources fossiles (hydrates de méthane, schistes bitumeux) posent des problèmes technologiques et environnementaux dont la maîtrise semble hors de portée actuellement.

1-3- Conclusion

Au stade actuel, les besoins d'énergie sont satisfaits essentiellement à partir de sources non renouvelables, ce qui place le monde devant un double défi :

- leur épuisement programmé pose la question de leur remplacement dans la perspective d'un développement durable ;
- l'usage des énergies fossiles, avec l'intermédiaire de l'énergie thermique, qui résulte de leur combustion, produit irrémédiablement du gaz carbonique (principal gaz à effet de serre, qui concourt au réchauffement climatique). Les ordres de grandeurs rappelés précédemment montrent que le remplacement par les EnR peut être significatif mais seulement partiel. Celles-ci ne pourront pas tout faire d'autant qu'elles ont, elles aussi, des inconvénients : intermittence (pour le solaire et l'éolien), coûts encore élevés et nuisance.

Dès lors, quelle stratégie adopter ? Les enjeux pour demain passent par des solutions complexes qui juxtaposeront divers modes de production. Nous envisageons dans la suite la question d'une utilisation optimale de l'énergie fondée sur une adéquation la plus rationnelle possible entre production et consommation.

2. QUELS ENJEUX ENERGETIQUES POUR UN DEVELOPPEMENT DURABLE ?

L'humanité est confrontée à un double défi : d'une part la criante inégalité des conditions de développement entre les pays, les zones géographiques et les populations, largement corrélée à l'accessibilité et à la disponibilité d'une énergie abondante et peu coûteuse, d'autre part les risques d'une exploitation des ressources amputant gravement l'héritage planétaire, dont l'homme a bénéficié, et détériorant irrémédiablement son environnement.

La seule politique raisonnable pour l'avenir est de cumuler, en les combinant au mieux, les diverses méthodes de production d'énergie en rapport avec l'expression maîtrisée des besoins. Ainsi une production délocalisée et proche du lieu de consommation, utilisant prioritairement les énergies renouvelables, doit être couplée à un mode de production massive et centralisée. En effet, la gestion de certains problèmes d'ordre environnemental, comme la séquestration des gaz à effet de serre et le traitement des déchets nucléaires, ne pourra être raisonnablement organisée qu'en production centralisée.

Nous discutons ci-après les postes principaux de consommation : filière énergétique, habitat, transports et industrie, pour en dégager les évolutions nécessaires pour améliorer l'efficacité de l'énergie utilisée.

2-1- Optimisation de la conversion entre énergies primaires et consommation finale

Il est frappant de constater que le premier poste de dépenses d'énergie primaire est associé aux pertes enregistrées dans les industries énergétiques ; concernant la France 97 Mtep pour un total de 259 Mtep en 2002. Ce poste est, de façon prépondérante (environ 170 Mtep) dû au faible taux de conversion entre énergie thermique et énergie électrique dans les réacteurs nucléaires actuels (type REP). Ces réacteurs, fonctionnant à l'eau sous pression, de température limitée à 320 °C, produisent une vapeur en entrée de turboalternateur à une température typique de 280 °C. Le rendement est alors de 0,33, c'est-à-dire proche du rendement théorique de Carnot qui est dans ce cas de 0,36. Les sorties thermiques sont alors peu exploitables.

A titre de comparaison, les températures dans le cas des surgénérateurs sont voisines de 440 °C et les centrales thermiques conduisent à des températures de vapeur de l'ordre de 540 °C. Ces dernières centrales se prêtent à la cogénération d'électricité et de vapeur, ce qui augmente le rendement d'usage global. Les turbines à gaz sont, quant à elles, d'une très grande flexibilité, appréciable dans les régimes transitoires, et efficaces pour leur rendement.

Du point de vue de la filière nucléaire, cette constatation rend nécessaire de concevoir des réacteurs à fission fondés sur des cycles atteignant des températures élevées (rendement de l'ordre de 0,7 à 900 – 1000 °C). On pourrait ainsi diviser par deux les pertes énergétiques et pratiquement doubler la production d'électricité. Il s'agit là d'une profonde mutation (programme dit de la Génération IV) qui correspond à un saut technologique très important, visant à assurer la fiabilité, à réduire les rejets d'effluents et la production de déchets à longue durée de vie. Le fluide caloporteur pourrait être l'hélium ou un mélange de sels fondus qui pourrait poser de délicats problèmes de corrosion pour les circuits.

Dans cette perspective, il est clair qu'un effort de grande ampleur en recherche et développement devra être entrepris à une échelle qui ne peut être celle d'un seul pays.

Le projet de réacteur à haute température (HTR) n'a de chance d'aboutir que s'il est considéré comme une priorité internationale avec des moyens adaptés, ce qui signifie qu'il doit être socialement accepté et pour cela clairement expliqué.

La deuxième cause de pertes est relative aux transports à distance de l'énergie électrique : 4 Mtep indépendamment du mode de production. On peut réduire ces pertes :

- en développant des unités de production décentralisées, quasi autonomes en moyenne annuelle. Une production locale intermittente, d'origine éolienne, marine ou solaire, ... sera associée à une source pérenne susceptible de palier les fluctuations de production des EnR. On pourra utiliser une combustion avec cogénération ou de nouveaux petits réacteurs nucléaires à haute température. Là encore l'approbation du corps social local sera nécessaire ;
- en recourant à une technologie avancée de matériaux supraconducteurs à température ambiante. Cette approche requiert un effort essentiel de recherche en amont ;
- les autres pertes relèvent des différents procédés pétrochimiques mis en œuvre et dont l'optimisation est déjà poussée.

2-2- Energie dans l'habitat

Les consommations énergétiques dans l'habitat résidentiel et tertiaire représentent le second poste de consommation dans notre pays : besoins de chauffage (dominants), de climatisation (faibles mais en expansion), d'eau chaude sanitaire et autres besoins couverts par le vecteur électricité (éclairage, électroménager, ...).

Dans la mesure où tout gain sur l'isolation se répercute à une échelle de l'ordre du Mtep, la recherche d'isolants thermiques pérennes, adaptés au comportement stationnaire et instationnaire des structures doit être prioritaire. D'autres gains sur la consommation peuvent être obtenus en optimisant le rendement d'usage de chaque appareil et de chaque système. A ce stade, la maîtrise de la consommation énergétique repose sur l'information des adultes, l'éducation des enfants, mais aussi sur la réglementation.

Des efforts technologiques, éventuellement des recherches, doivent être menés en ce sens, la réglementation pouvant aller jusqu'à pénaliser les dispositifs conduisant à un gaspillage énergétique avéré.

Les besoins de l'habitat peuvent être couverts par des vecteurs ou sources énergétiques variées. Si on part du principe que toute production systématique de CO₂ ne donnant pas lieu à séquestration doit être proscrite, l'usage de tout hydrocarbure sera, à long terme, banni ; le chauffage au bois pourrait être autorisé dans la mesure où il fait partie d'un cycle naturel de CO₂.

Dans ces conditions, chauffage et climatisation seront assurés par des EnR et des vecteurs énergétiques ne produisant pas de GES. L'énergie solaire thermique doit ainsi être systématiquement soutenue par voie réglementaire (on note que 3 m² de capteurs thermiques par habitant peuvent couvrir les besoins d'eau chaude sanitaire dans le sud de la France). L'encouragement de cette politique permet d'espérer un gain d'énergie primaire de 5 Mtep. L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque pourrait être envisagée si des solutions moins coûteuses que la filière silicium sont développées ; à ce titre la mise en œuvre de la technologie des couches minces permettrait un couplage thermique-photovoltaïque. Pour ce secteur de l'habitat, l'énergie géothermique ne peut être mise en œuvre que sur des sites spécifiques. Les vecteurs énergétiques susceptibles d'être utilisés à terme sont l'électricité, la chaleur et l'hydrogène.

La part de l'électricité devrait croître à l'avenir pour devenir prépondérante. Les réseaux de chaleur peuvent être utilisés à courte ou moyenne distance ; ils imposent une centrale de cogénération en tissu urbain avec le problème d'acceptabilité sociale ; cette solution est inadaptée à l'habitat dispersé. La part de l'hydrogène dépendra de la maîtrise des normes de sécurité associées à ce vecteur.

2-3- Energie et transports

Les transports représentent le troisième poste de consommation énergétique. Une gestion optimale dans ce secteur vise à :

- augmenter le taux de conversion de l'énergie primaire en énergie mécanique ;
- proscrire la production de GES ;
- minimiser la production de polluants (NOx, composés aromatiques, particules fines).

2-3-1- Les transports guidés

Cette forme de transport utilise quasi exclusivement l'énergie électrique. Le problème est donc celui de la production d'électricité dans une perspective de développement durable. Sous cette condition, les transports guidés doivent être généralisés pour les déplacements continentaux à moyenne distance (3 h de trajet). La contrepartie est le développement de plateformes efficaces pour favoriser la continuité avec le transport routier pour les courtes distances en début et fin de trajet. Les recherches entreprises sur l'intermodalité, en particulier par l'INRETS, devraient être amplifiées pour déboucher sur des réalisations optimales.

2-3-2- Les transports routiers

Une révolution va forcément prévaloir dans ce secteur à moyen terme. L'usage quasi exclusif de dérivés pétroliers pour la propulsion n'est plus acceptable dans les conditions actuelles d'utilisation :

- faible rendement de conversion en énergie mécanique des moteurs thermiques (0,3 à 0,35) ;
- génération massive de CO₂ par combustion, sans véritable possibilité de stockage ;
- production de polluants de natures diverses ;
- recherche et mise en place d'un vecteur énergétique de substitution pour palier l'épuisement progressif des ressources pétrolières.

Un rôle potentiel pour l'électricité se heurte aux difficultés de stockage de cette forme d'énergie dans des conditions de compacité satisfaisantes pour des usages de puissance sur de longues durées ; à moins d'une rupture technologique majeure, à court terme ce constat n'évoluera pas. Dans l'attente, des solutions hybrides se préparent. L'alternative qui se dessine comme la plus probable est l'hydrogène.

L'industrie automobile pourra constituer une voie d'utilisation massive pour ce combustible propre selon deux perspectives :

- l'usage d'une pile à combustible (technologie des piles à membrane polymère électrolyte). Malgré les progrès, on reste loin des standards requis en terme de rendement énergétique, de fiabilité et de coût. On peut cependant coupler cette solution à une batterie tampon qui permet une optimisation énergétique selon les nombreuses situations de conduite des véhicules. Un effort intense de recherche et de R et D doit être poursuivi et développé pour progresser dans ce domaine ;
- la combustion directe de l'hydrogène dans des moteurs adaptés dont le rendement peut atteindre 0,45. Des constructeurs ont déjà produit des prototypes mais là encore des travaux de recherche s'imposent pour surmonter les obstacles technologiques et les exigences de fiabilité et de sécurité.

La compétition stimulante va persister entre ces deux types de développement qui nécessitent l'un et l'autre la disponibilité, et donc la production, d'un gaz hydrogène de bonne pureté.

2-3-3- Les autres moyens de transport

Pour le transport aérien, il apparaît que même à long terme la propulsion basée sur la combustion d'hydrocarbures ne pourra être remplacée. Certains spécialistes, à horizon très lointain, n'excluent pas l'usage de l'hydrogène liquide (technologie spatiale) ou de piles à combustible à très hautes performances.

Le transport maritime peut passer à l'hydrogène ou utiliser, comme cela existe déjà, une propulsion d'origine nucléaire avec les risques graves de contamination en cas d'accident de navigation.

2-4- L'énergie dans l'industrie

Ce secteur confronté à la compétition économique a, depuis de nombreuses années, réalisé d'importantes économies qui le placent désormais au 4^{ème} rang des postes de consommation. D'une façon générale, on vise l'amélioration des procédés et des propriétés fonctionnelles des produits dont il résulte des économies à la fois d'énergie et de matière première (ex : industrie agro-alimentaire, sidérurgie, ...). Ainsi toute la chaîne d'élaboration des éléments qui composent le produit final doit concourir à la réduction de *son contenu énergétique* (exemple des cellules photovoltaïques au silicium).

Sur un plan général, la grande mutation qui reste à accomplir porte sur la séquestration systématique du gaz carbonique provenant des centrales thermiques à charbon ou à fioul et sur la suppression des sources de pollution.

Cette dernière remarque invite à une réflexion prospective concernant les vecteurs énergétiques à privilégier dans le moyen et le long terme pour jeter d'ores et déjà les bases d'un développement durable.

3. QUELS VECTEURS POUR L'ENERGIE DANS LE MOYEN - LONG TERME ?

L'énergie se trouve distribuée sous des formes variées à travers différents vecteurs présentant chacun des avantages préférentiels pour une disponibilité et un usage déterminé. Il en est ainsi de l'électricité, du gaz naturel, des dérivés du pétrole (voire du charbon) et de la chaleur.

Un nouveau vecteur pourrait prendre prochainement une place importante : l'Hydrogène.

Ce combustible, qui présente aussi l'avantage de permettre un stockage de l'énergie, est un atout essentiel pour une meilleure utilisation des sources d'énergie intermittentes et un candidat privilégié comme carburant dans les transports non guidés.

3-1- Mise en œuvre d'une filière hydrogène

3-1-1- Quel intérêt ?

L'hydrogène est un vecteur énergétique, qui évite toute production de CO₂, transportable en canalisation et stockable (selon une compacité énergétique qui doit être améliorée).

L'objectif est que l'hydrogène se substitue à terme aux hydrocarbures d'origine pétrolière dans les transports routiers, dans les usages industriels, voire les applications domestiques. Il sera utilisé dans les moteurs thermiques comme dans les piles à combustibles.

3-1-2- Modes de production

L'hydrogène n'existe pas à l'état naturel, sa synthèse nécessite une dépense énergétique. Actuellement son utilisation se réduit à celle d'un vecteur chimique.

La première voie de production a été le gaz à l'eau (réduction de la vapeur d'eau par du carbone) ; avec le gaz naturel, il est désormais produit par reformage du méthane à la vapeur d'eau. Dans les deux cas, sa fabrication s'accompagne d'une production importante de gaz carbonique.

Une deuxième voie résulte du craquage ou du vapocraquage de coupes pétrolières ; l'hydrogène est alors co-produit. Dès lors son utilisation énergétique accroît la production de CO₂.

L'électrolyse est utilisée pour la production d'hydrogène à haute pureté ; l'oxygène est alors co-produit, ce qui rend le procédé attractif malgré son coût énergétique. Le bilan devra prendre en compte la chaîne énergétique depuis la ressource primaire (solaire, hydraulique, éolien, nucléaire).

Une autre possibilité concerne la mise en œuvre de cycles thermo-chimiques (ex : procédé iode-soufre). Il n'y a pas encore de réalisation industrielle, mais il est intéressant d'établir un bilan énergétique global définissant les conditions favorables pour de tels procédés.

3-1-3- Stockage et transport de l'hydrogène

Le stockage est le problème critique de la filière hydrogène. Deux conditionnements extrêmes peuvent être utilisés : une compression hyperbare du gaz ($p > 700$ bars), un refroidissement cryogénique jusqu'à la liquéfaction ($T < - 253^{\circ}\text{C}$) ; d'autres font l'objet d'études, comme le stockage par hydrure métallique ou l'adsorption sur des nanomatériaux carbonés.

Le transport de l'hydrogène peut s'effectuer dans les canalisations type de gaz de ville ; un réseau industriel important est ainsi exploité dans le nord de l'Europe.

3-1-4- Utilisation et coût

L'hydrogène est destiné à deux usages qui nécessitent d'importants efforts de recherche :

- la pile à combustible comme système complexe de transfert de charges électriques, de chaleur et de masse, dont il faut assurer le contrôle dynamique ;
- le moteur thermique à hydrogène dont il faut améliorer le rendement, la souplesse de fonctionnement et la sécurité.

Les coûts restent encore prohibitifs comme le montre le tableau ci-dessous qui présente la comparaison des prix du GJoule en Euros selon qu'il est produit par la combustion du gaz naturel ou par celle de l'hydrogène selon ses différentes origines.

L'Islande, premier pays à relever ce défi scientifique, technologique et économique en utilisant comme énergie primaire ses ressources géothermiques et hydroélectriques pour produire de l'hydrogène a programmé son indépendance totale vis-à-vis du pétrole en 2030.

	Coût du GJoule en Euros
Gaz naturel brûlé	4
H ₂ produit par vapo-reformage du gaz naturel avec séquestration de CO ₂	10
H ₂ obtenu par biomasse	15
H ₂ par électrolyse de l'eau (électricité réseau)	25
H ₂ par électrolyse et électricité solaire	50
H ₂ par électrolyse et électricité éolienne	37

Coûts actuels comparés du GJoule produit par combustion du gaz naturel et par utilisation de l'hydrogène. Plusieurs voies de production d'hydrogène sont considérées (sur le site web : industrie.gouv.fr)

3-2- Le vecteur électricité

L'électricité a l'avantage pour l'utilisateur de la simplicité et de la commodité ; transportable avec des pertes acceptables, elle est par contre difficilement stockable en grande quantité. L'électricité peut être produite par conversion des énergies renouvelables : d'origine solaire (photovoltaïque), mécanique (voies hydraulique et éolienne), thermique (solaire et biomasse) avec possibilité de cogénération.

La problématique des énergies renouvelables est liée à leur caractère variable voire intermittent d'où le besoin de considérer leur combinaison avec une source classique. Les recherches à conduire dans ce domaine sont essentiellement d'ordre systémique. Il s'agit :

- d'intégrer la production dispersée dans les réseaux de distribution sans remettre en cause les infrastructures ;
- de profiter pleinement de la source renouvelable malgré les possibles déséquilibres entre l'offre et les besoins de consommation à un instant donné.

Dans le monde, l'électricité reste massivement produite par combustion des énergies fossiles ; la spécificité française privilégie la voie nucléaire et l'hydraulique.

A l'avenir, ce vecteur énergétique jouera un rôle encore plus important pour les applications statiques et le transport guidé ; son mode de production reposera sur :

- l'exploitation maximale des ressources renouvelables, compatible avec l'acceptation sociale et la rentabilité dans un cadre de développement durable ;
- l'usage maîtrisé de la combustion et de la production nucléaire ;
- l'optimisation du recours à des productions délocalisées à différentes échelles de consommation (quartier, ville, région, ...).

3-3- Les hydrocarbures et le charbon

Ces énergies fossiles produisent massivement du CO₂ lors de leur combustion. Celui-ci doit être séparé et stocké, ce qui relève du génie des procédés, avant d'être transporté, puis séquestré, ce qui relève des sciences de l'univers.

La séparation systématique du CO₂ des produits de combustion et son stockage sur le très long terme relèvent de technologies existantes ou en cours de validation. L'enjeu est considérable sur le plan du coût de la sécurité et de la longévité de telles opérations qui demandent des efforts de recherche et de R et D.

3-4- La chaleur, autre vecteur énergétique

La chaleur peut être transportée sans pertes appréciables sur de faibles distances (qualité d'isolement des canalisations du réseau). Sur des distances plus grandes, on peut envisager la mise en œuvre de cycles thermo-chimiques.

Cette chaleur est généralement produite pour utiliser au maximum la combustion des ressources fossiles d'un point de vue thermodynamique, en cogérant de l'électricité et de la chaleur. Les centrales nucléaires actuelles présentent peu d'intérêt pour cette option dans la mesure où les circuits de refroidissement opèrent à bas niveau de température. Industriellement, la situation est plus favorable lorsque le besoin de chaleur est couplé à un besoin important en électricité. On peut étendre le concept de la cogénération à la production conjuguée d'hydrogène et de chaleur. D'un point de vue général, la cogénération se justifie désormais en fonction des besoins énergétiques à condition que des solutions de séparation et de stockage du CO₂ coproduit soient validées à des coûts acceptables.

3-5- Conclusion

Cette revue des différents vecteurs énergétiques disponibles ou à développer pour satisfaire les besoins de nos sociétés s'inscrit dans un contexte planétaire de contraintes géopolitiques et économiques. Celles-ci seront surmontées par la résolution d'un certain nombre de défis scientifiques et technologiques qui vont être identifiés et discutés dans la dernière partie de ce document.

4. DES DEFIS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES A RELEVÉ

Il s'agit d'identifier les progrès et les percées nécessaires pour assurer demain la production énergétique et son usage efficace permettant de satisfaire les besoins qui conditionneront le développement économique des sociétés humaines tout en préservant son caractère durable. Dans cette perspective, on s'intéresse aux domaines qui présentent certains handicaps à surmonter impérativement. On aborde ici l'énergie solaire qui doit voir ses coûts sensiblement réduits, la biomasse qui requiert le développement de méthodes de production et d'utilisation économiquement viables, l'énergie nucléaire par fission dont il faut régler à terme le problème des déchets et le cas de la fusion nucléaire qu'il est essentiel de maîtriser à long terme.

4-1- Le recours à l'énergie solaire

Le gisement de l'énergie solaire doit participer fondamentalement au bilan énergétique global, que l'on envisage une utilisation locale non concentrée (thermique ou photovoltaïque) ou des solutions avec concentration.

Ainsi l'énergie solaire thermique à basse température, qui représente nettement moins qu'un millième de la consommation énergétique finale de l'habitat en France, doit impérativement être développée en se fondant, au besoin, sur une base réglementaire. Elle ne nécessite à ce stade pas de véritable effort de recherche technologique, si ce n'est au niveau de la standardisation, la normalisation et la maintenance des installations. Les avancées porteront sur la fiabilité et la baisse des coûts d'entretien des systèmes.

Le solaire photovoltaïque peut devenir intéressant pour l'habitat isolé si les capteurs de type couches minces peuvent atteindre des rendements comparables à ceux à base de silicium car ils peuvent aussi assurer une fonction de capteur thermique. Des recherches seront à encourager pour permettre la réduction des coûts dans un rapport 10.

La climatisation d'origine solaire mérite d'être développée et appliquée en France à de grands habitats comme c'est déjà le cas en Allemagne ou en Suisse.

Enfin le recours à des centrales thermiques à concentration peut s'envisager dans les zones méridionales du pays.

4-2- Le développement de la biomasse

Une concurrence pour l'hydrogène pourra venir des combustibles issus de la biomasse. Le gisement peut couvrir 10 % des besoins. Les processus de base de la conversion sont connus mais leur rendement énergétique est faible. Ainsi, il faut un litre de pétrole pour produire un litre et demi de bio-éthanol.

Améliorer ce rendement est un enjeu de recherche. Il convient aussi de gérer les déchets occasionnés par la conversion ; il faut en outre veiller à produire des combustibles purs pour éviter la présence de produits nocifs dommageables pour la santé publique. Les programmes de recherche doivent intégrer l'ingénierie cellulaire (micro-organismes de performances), l'ingénierie de produits (valeurs d'usage) et l'ingénierie de procédés (techniques d'élaboration).

4-3- Energie nucléaire par fission

L'énergie nucléaire va demeurer une source indispensable d'énergie dans la perspective d'accroissement des besoins au niveau mondial (probable doublement d'ici 2050). Actuellement les problèmes se posent au niveau de la sûreté, des déchets et de l'épuisement du combustible.

S'agissant du programme du nouveau réacteur, type ERP, le risque d'accident a été réduit d'un facteur 10 vis-à-vis de la génération précédente.

Le problème des déchets se traite à plusieurs niveaux :

- l'enfouissement sous conditionnement de stockage assuré sur de très longues durées ;
- la destruction de déchets par incinération dans des réacteurs dédiés ;
- la réduction, en volume et dans le temps, de la radioactivité des déchets produits.

Des solutions techniques permettant de traiter ces points sont proposés dans le cadre de recherches initiées par la loi Bataille.

Pour ce qui est de l'utilisation de l'isotope U238, pour palier l'épuisement de l'isotope U235, de nouveaux réacteurs rapides à hélium ou à sels fondus sont au stade des études de faisabilité scientifique et technique ; dans tous les cas la montée en température permettant d'améliorer les rendements est une priorité qui demande des avancées technologiques majeures en sciences des matériaux (programme du réacteur de génération IV). Plus globalement, l'effort de recherche pour aboutir à ce résultat doit être continu, impliquant le CEA, les acteurs universitaires, du CNRS et de l'industrie concernés par le domaine. Il s'agit de recherches très variées qui touchent aussi bien aux sciences fondamentales (physique, chimie), aux sciences de l'ingénieur (fluides, énergétique, procédés, génie électrique et génie civil), qu'à la science des matériaux. Dans cette perspective la France doit rester un des leaders mondiaux de la filière.

4-4- Perspectives de la fusion nucléaire

La maîtrise de la fusion à des fins énergétiques s'inscrit dans une démarche de très long terme, probablement sur la totalité de ce siècle. On peut espérer la réaliser selon deux méthodes :

- en comprimant très fortement une bille de combustible (deuterium ou un mélange deuterium- tritium) à l'aide de faisceaux laser ou d'ions lourds ;
- en confinant le plasma correspondant par des champs magnétiques intenses.

Dans les deux cas, il y aura réussite si l'énergie libérée dans le plasma par la fusion surpasse l'énergie dépensée pour le former (ignition). L'installation JET d'Oxford qui repose sur la technologie du Tokamak s'est approchée à moins d'un ordre de grandeur des conditions de l'ignition.

L'espoir réside désormais dans le projet ITER dont les perspectives d'implantation à Cadarache sont actuellement en discussion. Il s'agit de combiner les progrès réalisés avec JET et la technologie supraconductrice mise en œuvre avec TORE SUPRA.

Il reste à parcourir ce dernier ordre de grandeur alors que 7 ordres de grandeur ont été gagnés en 40 ans. Les spécialistes pensent que les applications ne verront le jour qu'à la fin du siècle, mais l'enjeu représente une perspective de résolution quasi définitive des problèmes d'approvisionnements énergétiques de l'humanité.

Les engagements très forts de la France et de l'Europe dans le projet ITER sont très favorables pour faire aboutir cette recherche essentielle.

5. CONCLUSION

On peut établir pour la France le constat global suivant.

Même avec un effort maximal de développement de toutes les énergies renouvelables, l'énergie ainsi produite resterait inférieure à 45 % de l'énergie finale consommée en 2002 ; celles-ci ne peuvent donc à long terme satisfaire qu'une partie limitée des besoins. Elles doivent néanmoins être encouragées y compris par la voie réglementaire dans la limite de l'acceptation sociale et de la rationalité économique. Un effort de recherche diversifiée doit être impérativement confirmé dans le domaine, en particulier pour le solaire.

A long terme, les seules ressources non renouvelables seront le charbon et le nucléaire. La situation de notre pays, qui ne dispose pas de combustibles fossiles, conduit à exploiter les voies nucléaires du futur. Celles-ci seraient développées pour produire de l'électricité, de l'hydrogène ou de la chaleur. Cela passe par des réacteurs à rendement amélioré avec possibilité de recycler les déchets ; c'est l'enjeu de la génération IV qui doit mobiliser un effort considérable de recherche de base et technologique dans pratiquement tous les domaines. C'est évidemment aussi la condition du succès du projet ITER. L'ensemble de ces programmes peut induire des opérations très structurantes pour les communautés scientifiques concernées.

Dans cette vision, le recours à une production d'énergie à partir d'hydrocarbures et de charbon reste une voie complémentaire (cogénération). Mais la maîtrise de l'effet de serre implique de minimiser les émissions de CO₂ qui sont issues de leur combustion. Des recherches sur la séparation et la séquestration des GES deviennent alors prioritaires.

Pour cette même raison, les vecteurs énergétiques devraient évoluer. La propulsion des véhicules non guidés devra arriver à moyen terme au combustible hydrogène. On retrouve ici des enjeux forts de recherche pour la production, le stockage et l'utilisation de ce gaz *idéal*.

L'électricité devrait se développer comme source d'énergie dans l'habitat avec une concurrence (complémentarité ?) de la chaleur. Elle devrait par contre s'imposer dans le transport guidé.

Une utilisation rationnelle de l'énergie repose sur l'optimisation de l'usage des sources énergétiques dans l'habitat résidentiel et tertiaire. La généralisation progressive de capteurs solaires thermiques permettrait par exemple d'économiser une dépense énergétique équivalente à toute la consommation d'eau chaude sanitaire.

Sur un plan plus général, une démarche de conception d'un appareil ou d'un produit, désigné par un objectif de fonctionnalité, qui intégrerait dans l'analyse du cycle de vie de cet objet un critère de consommation énergétique optimisée, enrichirait notablement l'approche de la *conception durable*.

Il faut enfin insister sur l'impact des problèmes d'énergie sur l'économie et l'environnement avec des conséquences directes sur la vie et le développement des sociétés. La prospective dans ce domaine a donc également besoin de réflexions et de recherches pour éclairer le cadre économique, juridique, social et humain dans lequel le monde évolue ; ainsi les modes de vie, l'attente sociale, les craintes d'ordre environnemental, les dispositions réglementaires, les contraintes économiques et le contexte géopolitique sont autant de facteurs, dont l'analyse paraît aujourd'hui indispensable dans la détermination des choix stratégiques d'une nation ou d'une communauté d'états. Les sciences économiques, humaines et sociales sont évidemment concernées et doivent s'impliquer largement dans un domaine aussi déterminant pour l'évolution de l'humanité.

HYBRIDION

Membranes protoniques conductrices hybrides



Responsable scientifique : Philippe BARBOUX

BARBOUX Philippe, Ecole Polytechnique, Laboratoire de la physique de la matière condensée, 1 route de Saclay, 91128 PALAISEAU

JUDEINSTEIN Patrick, Université Paris Sud, RMN en milieu orienté, Bâtiment 410, 91405 ORSAY

SPALLA Olivier, CEA Saclay, DRECAM/SCM LIONS, 91191 GIF SUR YVETTE

Les piles à combustible de type PEMFC sont actuellement basées sur des polymères acides sulfonés intercalés entre des électrodes poreuses activées par des catalyseurs à base de dispersions de métaux nobles. Ce projet propose de démontrer la faisabilité d'une pile à combustible de type polymère originale ne contenant aucun de ces éléments en se basant sur des dispersions de nanoparticules d'oxydes dans des matrices polymères neutres ou actives.

La forte surface spécifique d'oxydes colloïdaux préparés par chimie des solutions (procédés sol-gel) ou spray-drying, dispersés dans des polymères permet de générer une concentration élevée de porteurs de charges protoniques par ionisation des sites de surface de ces oxydes. L'acidité de ces oxydes sera améliorée par un greffage de fonctions organiques acides (phosphonates et sulfonates). La mobilité des protons sera obtenue par la création d'un réseau de conduction connexe obtenu par la dispersion de ces oxydes dans des polymères de basicité adaptée. Le mécanisme de conduction peut alors s'affranchir de la présence de porteurs de charges mobiles (eau ou ions phosphates libres) qui limitent en particulier l'utilisation en température. Les membranes seront testées dans des piles PEMFC à 150°C.

Biocatalyse et PEMFC

Pile à combustible basse température : intégration d'un catalyseur biologique pour réduire la quantité en métal précieux



Responsable scientifique : Régine BASSEGUY

Régine Basséguy (coordinateur), Alain Bergel, Luc etcheverry (LGC)
Christophe Turpin, Stephan Astier, Jean-Marc Blaquièrre, Vincent Baheux (LEEI)
Laboratoire de Génie Chimique LGC UMR 5503, Toulouse
Laboratoire d'Electrotechnique et d'électronique Industrielle LEEI UMR 5828, Toulouse

Le projet porte, dans un premier temps, sur l'amélioration de la phase de démarrage d'une pile à combustible PEM, et dans un second temps, sur l'évaluation du remplacement du platine par un catalyseur moins onéreux. La volonté est clairement de valoriser industriellement le plus rapidement possible le concept de « biopile » qui a fait l'objet d'un brevet CEA-CNRS. Ce concept constitue une véritable rupture technologique qui pourrait accélérer la diffusion des piles à combustible en baissant considérablement leur coût. Il s'agit ici de réaliser le premier exemple de « biopile de puissance ».

Plus précisément, l'innovation réside dans l'intégration d'une catalyse enzymatique sur la réaction cathodique de réduction de l'oxygène. Cette catalyse permettra de réduire la surcharge en platine (métal cher et en quantité limitée), voire de le remplacer par des métaux moins onéreux du type acier inoxydable. Il s'agira, dans la première phase, de proposer des voies d'intégration de cette biocatalyse dans un système de pile à combustible en définissant notamment des stratégies optimales de démarrage via l'enzyme par une gestion thermique pertinente.

La clé du projet tient à la capacité des deux laboratoires à intégrer la globalité du système et sa finalité dès la conception du cœur de pile. L'approche sera nécessairement multidisciplinaire.

Minéralisation du CO₂

Séquestration de CO₂ à très long terme par minéralisation solide dans les réservoirs gréseux et silicatés



Responsable scientifique : Dominique BERNARD

Dominique BERNARD, ICMCB, UPR 9048, PESSAC
Pierre M ADLER, Géomagnétisme et Paléomagnétisme, UMR 7577, Paris
Philippe GOUZE, TPHY/ISTEEM, UMR 5568, Montpellier
Isabelle MARTINEZ, Lab. Géochimie des isotopes stables, UMR 7047, Paris
Emmanuel MOUCHE, LSCE, UMR 1572, Gif sur Yvette
François RENARD, LGIT, UMR 5559, Grenoble
Jacques SCHOTT, LMTG, UMR 5563, Toulouse

Durant la phase transitoire qui aboutira à une réduction de l'usage d'éléments carbonés dans l'ensemble des formes d'énergie utilisées, la capture du CO₂ produit dans les installations industrielles ou collectives et sa séquestration semblent indispensables pour réduire les quantités de CO₂ atmosphérique. L'injection et le stockage définitif dans des formations géologiques perméables (aquifères salés ou réservoirs pétroliers) apparaissent actuellement comme la solution la plus mature pour la séquestration. Dans ces formations géologiques, le CO₂ peut être piégé de différentes manières : piégeage hydrodynamique sous forme de gaz immobilisé, piégeage par dissolution dans les phases liquides en place et piégeage minéral sous forme de carbonates.

Le projet "**Séquestration de CO₂ à très long terme par minéralisation solide dans les réservoirs gréseux et silicatés**" a pour objectif général l'estimation de l'efficacité globale de la séquestration minérale dans un réservoir de type silicaté. Seule une simulation numérique complète du processus de séquestration (totalité du processus d'injection à l'échelle de la structure géologique entière) peut permettre d'atteindre un tel objectif. Pour cela il faut disposer de modèles numériques prenant en compte tous les phénomènes ayant une influence, utilisant des équations qui représentent raisonnablement ces phénomènes à l'échelle considérée et il faut connaître les valeurs correctes de tous les paramètres physico-chimiques et physiques. Les sept équipes participant à ce projet se proposent d'apporter des éléments de réponse pour ces trois points en mettant en œuvre des modélisations numériques et expérimentales à différentes échelles (12 ordres de grandeur sont couverts).

Nanométrique : Interface solution-cristal

Une nouvelle approche de modélisation est proposée par le TPHY pour la détermination par modélisation moléculaire des cinétiques de réaction pour les domaines de pression et température non accessibles expérimentalement. Les travaux du LMTG auront pour but d'acquérir des données nouvelles sur la dawsonite, la stabilité des complexes aqueux métal-carbonates et l'impact, sur les vitesses de réaction, des ligands organiques et inorganiques présents dans les fluides sédimentaires. L'équipe IPGP-2 se propose d'évaluer, dans une configuration expérimentale simplifiée, l'accélération de la cinétique de séquestration du CO₂ en carbonates ou son blocage, en présence de souches sélectionnées de bactéries sulfato-réductrices et uréolytiques. Le LGIT propose d'étudier l'effet des pCO₂ assez élevées (de 20-100 bars pCO₂) sur la vitesse de dissolution des feldspaths, pour des températures de 25-200 °C.

Micrométrique : Echelle du pore

Les méthodes de traitement et d'analyse des données 3D obtenues par microtomographie synchrotron qui ont été principalement développées dans le cadre du projet PICOR (en particulier par l'ICMCB) seront utilisées pour la caractérisation de la microgéométrie à cette échelle. Les codes de l'équipe IPGP 1 seront étendus pour intégrer une modélisation plus sophistiquée des réactions géochimiques. Le TPHY propose de développer les capacités de la méthode SPH « Smoothed Particule Hydrodynamics », méthode Lagrangienne non-maillée, qui paraît prometteuse pour rendre compte de façon efficace de la modification des interfaces fluide-roche. La proposition de l'ICMCB concerne l'estimation des différentes surfaces d'échange (saumure/solide et saumure/gaz) expérimentalement (microtomographie de laboratoire et synchrotron) et numériquement (code Monte Carlo original conçu pour calculer les transferts dus à la capillarité).

Millimétrique : Echelle de la carotte

Des expériences de percolation réactive (jusqu'à 100 °C et 80 bars de CO₂) seront réalisées au LMTG sur des carottes de carbonates/gypse et de silicates (notamment ponces). Les déformations mécano-chimiques à long terme seront mesurées au LGIT lors de la circulation d'un fluide chargé en CO₂. Après contrôle grâce au microtomographe de laboratoire de Bordeaux les échantillons seront microtomographiés à l'ESRF avec une précision de l'ordre du micron. Les résultats obtenus seront traités à l'ICMCB pour en tirer des valeurs de surface d'échange gaz-liquide-solide. Pour les effets de la biosphère, les résultats obtenus in situ à petite échelle par l'équipe IPGP 2 seront comparés à des résultats obtenus dans des conditions s'approchant de celles d'une injection de CO₂.

Métrique : Hétérogénéités

L'objectif du LSCE est d'apporter par la simulation numérique des éléments de compréhension de la répartition du CO₂ dans un aquifère salin en fonction du type d'hétérogénéité envisagée.

HYDRALANE

Stockage réversible de l'hydrogène par les hydroaluminates. Amélioration des vitesses d'absorption -désorption par action catalytique.



Responsable scientifique : Bernard BONNETOT

BONNETOT Bernard, UCBL 1, Laboratoire des Multimatériaux et Interfaces, Bâtiment Berthollet, 43 Bd du 11 nov. 1918, 69622 VILLEURBANNE

AUROUX Aline, Institut de Recherche sur la Catalyse, CNRS, 2 avenue A. Einstein, 69626 VILLEURBANNE
PERCHERON-GUEGAN Annick, Laboratoire de Chimie Métallurgique des Terres Rares, 2-8 rue Henri Dunant, 94320 THIAIS

MASSIOT Dominique, Centre de Recherche sur les matériaux à Hautes Températures, 1D avenue de la recherche scientifique, 45071 ORLEANS

Le stockage réversible de l'hydrogène est un des points durs dans le développement de ce vecteur énergétique. Les aluminates de sodium sont des hydrures capables d'absorber et de désorber 5,5 % en masse d'hydrogène dans des conditions de température et de pression compatibles avec une utilisation domestique ($P(H_2) = 1 \text{ bar}$ à 40°C). Si la thermodynamique fixe les bornes de température et de pression des équilibres, la cinétique d'absorption et de désorption est un facteur primordial pour une utilisation des hydrures dans le stockage.

Dans une première partie de l'étude, une vérification des conditions de stockage reportées dans la littérature sera effectuée sur l'aluminate de sodium dopé au titane. Ce travail permettra de vérifier les résultats publiés et de valider la méthodologie expérimentale. Toujours dans le domaine des aluminates de sodium activés par le titane, d'autres méthodes de préparation seront testées comme un dépôt par CVD basse température de titane pour obtenir des dispersions nanométriques de métal sur la surface de l'aluminate.

Une seconde partie de cette étude sera consacrée à la préparation et à l'étude d'aluminates de sodium sous-dopés par des métaux nobles (palladium, platine) à moins de 1 % poids. L'objectif est d'améliorer les propriétés d'absorption de l'hydrogène par l'utilisation de catalyseurs plus efficaces que le titane donc de diminuer les temps de chargement et déchargement en combustible. Les propriétés thermodynamiques et cinétiques d'absorption-désorption d'hydrogénation seront déterminées par méthode de Sievert (volumétrie) en fonction de la température. La microscopie électronique à transmission sera utilisée pour localiser l'élément dopant (ou catalyseur) à l'échelle nanométrique et caractériser de la microstructure du composé. Cette caractérisation sera complétée par des mesures d'absorption X (XANES, EXAFS) afin de définir l'environnement de l'élément dopant à l'échelle atomique. Après cette étude, il sera possible d'envisager sérieusement les possibilités d'utilisation des aluminates pour le stockage réversible de l'hydrogène.



Pascal Brault, Anne-Lise Thomann, Amaël Caillard GREMI – UMR6606 CNRS- Université d'Orléans
Jean Durand, Stéphanie Roualdès IEMM – UMR5635 CNRS – Université Montpellier II
Jean-Michel Léger, Christophe Coutanceau LACCO – UMR 6503 CNRS – Université de Poitiers

La pertinence de l'utilisation des plasmas pour la synthèse des matériaux de cœur de piles PEMFC a été démontrée dans le PRI 3.1 Co-PACEM Programme Energie 2002-2003.

Le GREMI s'est spécialisé ces dernières années sur la pulvérisation plasma haute densité pour la réalisation des électrodes. Dans le projet PLASMAPAC, il s'agit d'élargir cette activité à la co-pulvérisation de plusieurs éléments pour réaliser des électrodes à gradients de concentration de catalyseurs. Les premiers résultats de ces derniers mois ont montré que les conditions plasma à la surface de l'électrode sont responsables de la forme de ce profil de concentration. Une étude paramétrique complète est en cours sur le platine. Elle doit permettre de quantifier l'influence des paramètres plasmas, tels que la puissance, la polarisation de l'électrode, sur la répartition et l'organisation du catalyseur dans l'électrode. Des études RBS et HRTEM sont en cours. De plus, il est fait appel aux équations non linéaires de la diffusion dans les milieux poreux pour rendre compte des profils de concentration dans l'électrode. Les premières études sur les alliages PtRu, catalyseurs anodiques dans les piles DMFC ont démarré. Là encore la forme du profil est largement fonction des conditions plasma. De plus, la composition en profondeur de Pt et Ru est également fonction des conditions plasma. Dans un premier temps, il sera nécessaire d'évaluer les performances électrocatalytiques de ces électrodes afin de sélectionner les meilleures pour des tests en piles.

A l'IEMM, des membranes conductrices protoniques à site échangeurs sulfoniques ont été synthétisées à partir d'un mélange de précurseurs styrène/CF₃SO₃H soumis à une décharge lumineuse basse-fréquence. Les membranes plasma ainsi obtenues se présentent sous la forme de dépôts homogènes de quelques microns d'épaisseur. La caractérisation des matériaux par IRTF et XPS met en évidence une structure chimique formée d'une matrice carbonée à base de cycles benzéniques et contenant une proportion de groupements sulfoniques conducteurs protoniques (jusqu'à 5% dans les conditions de synthèse optimales) supérieure au Nafion® 117. La conductivité protonique des membranes plasma a été mesurée par spectroscopie d'impédance électrochimique dans différents types de cellules. Malgré leur richesse en groupements acides sulfoniques, les membranes plasma sont bien moins conductrices (conductivité $\leq 10^{-1}$ mS/cm) que la membrane Nafion® 117 du fait de leur structure désordonnée et très réticulée. De par leur faible épaisseur, leurs résistances spécifiques (de l'ordre de 2 $\Omega \cdot \text{cm}^2$) sont néanmoins équivalentes à celles du Nafion® 117. Des mesures de perméabilité des membranes plasma au méthanol ont également été réalisées dans une cellule de type Hittorf à partir de mélanges eau / méthanol (5-10%). Du fait de leur structure tridimensionnelle très réticulée, les membranes plasma étudiées sont intrinsèquement 300 à 800 fois moins perméables au méthanol que la membrane Nafion® 117. L'utilisation en pile à combustible miniature de telles membranes d'épaisseurs de 1 à 10 μm peut permettre une réduction du flux en méthanol d'un facteur 2 à 50 par rapport au Nafion® 117.

La tâche de l'équipe "Electrocatalyse" du LACCO est d'évaluer l'activité électrocatalytique des électrodes synthétisées par pulvérisation plasma vis-à-vis de l'oxydation du méthanol. Un des avantages de cette technique est de pouvoir obtenir des électrodes avec de très faibles chargements en métaux précieux et de pouvoir localiser ce métal de façon à optimiser son utilisation. Les premières évaluations ont été réalisées sur des électrodes Pt/C avec des chargements en platine allant de 40 à 170 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^2$. Il a été clairement montré que le taux d'utilisation du métal était plus important que dans le cas d'électrodes commerciales traditionnellement utilisées dans des piles à combustible (électrodes ETEK). On doit pouvoir trouver des conditions expérimentales de dépôt permettant d'avoir un taux maximal d'utilisation. Cette phase préliminaire de l'étude va être prolongée rapidement par l'évaluation d'électrodes bimétalliques (Pt-Ru) avec dans ce cas le but d'optimiser la localisation des deux métaux afin à la fois d'améliorer le taux d'utilisation et surtout d'optimiser la composition de l'électrode. Des mesures effectuées au LACCO depuis plusieurs années ont en effet montré qu'une composition de l'ordre de 20% atomique en Ru était un optimum pour obtenir une bonne activité vis-à-vis de l'oxydation du méthanol. La technique plasma doit pouvoir permettre d'affiner à la fois la localisation des particules métalliques et leurs compositions. Ces premières mesures ont été réalisées avec des membranes ionomères commerciales, mais seront ensuite entreprises avec les membranes synthétisées par voie plasma à l'IEM.

MICROSOFC

Nouvelle génération d'électrolytes microstructurés et de cathodes pour les piles à combustible à oxyde solide



Responsable scientifique : Michel CASSIR

CASSIR Michel, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris, Laboratoire d'Electrochimie et de Chimie Analytique, 11 rue Pierre et Marie Curie, 75231 PARIS Cedex 05

PIJOLAT Christophe, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Laboratoire de Procédés en Milieux Granulaires, 158 Cours Fauriel, 42023 SAINT ETIENNE Cedex 2

BASSAT Jean-Marc, Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux, 87 avenue du Dr A. Schweitzer, 33608 PESSAC Cedex

ANSART Florence, Université Paul Sabatier, Centre Interuniversitaire d'Ingénierie et de Recherche sur les Matériaux, 118 Route de Narbonne, 31062 TOULOUSE Cedex 4

BILLARD Alain, Ecole des Mines de Nancy, Laboratoire de Science et Génie des Surfaces, Ecole des Mines Parc de Saurupt, 50042 NANCY Cedex

Ce projet vise l'abaissement de la température de fonctionnement des SOFC, privilégiant la mise en forme et la recherche de nouveaux matériaux du cœur de pile. La voie choisie inclut l'obtention de couches minces micro- ou nano-structurées d'électrolyte par des techniques innovantes (méthodes sol-gel, pulvérisation cathodique, dépôt de couches atomiques) et l'adaptation de matériaux cathodiques, notamment à conduction mixte, permettant de réduire les surtensions de réduction de l'oxygène. Il s'agit aussi de l'analyse et de l'optimisation de l'interface électrolyte/cathode qui permettra de définir la limite d'épaisseur des couches compatibles avec la mise en œuvre des SOFC et d'établir des corrélations entre les propriétés de ces matériaux et les performances de demi - cellules et de cellules à anode support. Un modèle de cellule SOFC sera affiné à partir des données expérimentales obtenues.



CLEMENT Alain, Ecole Centrale de Nantes, Laboratoire de Mécanique des Fluides, 1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 NANTES Cedex 3

GUGLIELMI Michel, Ecole Centrale de Nantes, Institut de Recherche en Communication et Cybernétique, 1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 NANTES Cedex 3

MULTON Bernard, Ecole Normale Supérieure de Cachan, SATIE, Campus de Ker Lann, 35170 BRUZ

Le projet SEAREV vise à développer, à cinq ans, un prototype de flotteur de récupération d'énergie des vagues (~1MW), exploitant un procédé original développé par le LMF (UMR 6598 du CNRS) pour produire de façon primaire de l'électricité à partir de cette énergie. Cette source d'électricité offshore pourra ensuite être exploitée pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Cette filière d'énergie renouvelable, encore méconnue en France, se développe rapidement dans d'autres pays européens et les premiers prototypes de seconde génération arrivent aujourd'hui à la mer (Ecosse-Portugal). Depuis 20 ans les rendements ne cessent de s'améliorer au fil des recherches et le seuil de rentabilité est presque atteint aujourd'hui. Le procédé que nous proposons est susceptible d'apporter une véritable rupture grâce à un type de contrôle non encore exploité sur les prototypes existants.

La première phase du projet (3 ans) a pour objectif de développer un démonstrateur à l'échelle 1/15 pour le tester dans la grande cuve à houle multidirectionnelle (30 m x 50 m) récemment mise en service au Laboratoire. Trois Unités Mixtes de Recherche du CNRS participent à ce projet. La première année (2003/2004) a été partiellement financée par l'Action Concertée Energie 2003 dans laquelle SEAREV figure au titre de Projet Exploratoire (PE3). Nous souhaitons qu'il entre cette année dans la catégorie des Projets de Recherche de l'ACI 2004 afin de poursuivre le travail maintenant bien engagé, jusqu'à l'étape de démonstration qui nous permettra d'élargir notre partenariat vers les industriels du secteur énergie.



DAVID Sylvain, Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, 15 rue Clemenceau, 91406 ORSAY Cedex
MEPLAN Olivier, Université Joseph Fourier, Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, 53 avenue des martyrs, 38026 GRENOBLE Cedex 1
KIRCHNER Thomas, Ecole des Mines de Nantes, Laboratoire de Physique Subatomique et des Technologies associées, 4 rue Alfred Kastler - BP 20722, 44307 NANTES Cedex 3
LECOLLEY Jean-François, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Caen, Laboratoire de Physique Corpusculaire, 6 bd du Maréchal Juin, 14050 CAEN Cedex 4

Le sujet de l'énergie nucléaire et des réacteurs du futur est largement étudié au niveau international. Différentes visions s'affrontent aujourd'hui, en particulier autour du déploiement rapide ou non de réacteurs de quatrième génération. Le projet a pour but principal de décrire les différentes caractéristiques physiques des différents scénarios nucléaires du futur. On s'intéressera notamment à étudier en détail l'option de poursuite des réacteurs standards (REP ou EPR), couplés ou non à des incinérateurs d'actinides mineurs (scénarios double strate avec réacteurs hybrides). Nous étudierons également les scénarios faisant appel aux réacteurs de 4ème génération, en distinguant les réacteurs rapides à sodium, qui sont aujourd'hui les seuls réacteurs surgénérateurs dont la technologie peut être considérée comme acquise. Pour les réacteurs plus innovants, comme les réacteurs rapides refroidis au gaz, ou les réacteurs à sels fondus fonctionnant sur le cycle du thorium, il conviendra de mettre clairement en évidence leurs avantages et inconvénients spécifiques, ainsi que les verrous technologiques qu'il sera nécessaire de lever pour atteindre la faisabilité industrielle. Les critères de comparaison de ces différentes options devront être soigneusement choisis, et concerneront notamment la quantité de déchets produits (radiotoxicité et chaleur résiduelle à long terme), le potentiel et la souplesse de déploiement (adaptation à différents scénarios de demande nucléaire), les faisabilités scientifique et industrielle, les aspects économiques, etc...



P. Destruel, I. Séguy, LGET, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex
J. F. Nierengarten, M. Holler, ECPM, 25 rue Becquerel, F67087 Strasbourg Cedex 2
H. Bock, E. Grelet, CRPP, Avenue Albert Schweitzer, 33600 Pessac
C. Alonso, B. Estibals, LAAS-CNRS, 7, avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse Cedex 4

Le premier paramètre important permettant l'obtention d'un photocourant dans une cellule photovoltaïque organique est la capacité du matériau à générer des charges par transfert d'électron du donneur vers l'accepteur sous l'action de la lumière. Par la suite, sous l'influence du champ électrique interne, ces charges doivent migrer jusqu'aux électrodes pour y être captées. Le second paramètre important est donc la mobilité des porteurs de charge qui doit être la plus élevée possible. Les performances de ce type de dispositifs peuvent donc être optimisées en concevant des matériaux organiques combinant une séparation photoinduite des charges efficace avec de bonnes propriétés de conduction. L'objectif de notre projet est de réaliser la synthèse de nouveaux matériaux moléculaires et/ou polymères pour la préparation de cellules photovoltaïques. L'énergie produite sera traitée par des convertisseurs statiques étudiés au LAAS (UPR 8001).

Cette étude implique des Laboratoires des secteurs Chimie et STIC. Le CRPP (UPR 8641) synthétise des matériaux discotiques. L'IPCMS (UMR 7504) synthétise des molécules hybrides C₆₀-donneur possédant des propriétés « cristal liquide ». Ces deux familles de matériaux permettent d'explorer les deux voies les plus prometteuses pour dissocier efficacement les excitons et atteindre des mobilités des charges électriques élevées.

La première de ces voies consiste à réaliser des cellules à partir de molécules discotiques synthétisées au CRPP à Bordeaux. La particularité de ces matériaux est de posséder une phase cristal liquide colonnaire présentant des degrés d'ordre typiquement représentatifs du solide cristallin, et en même temps la fluidité et la malléabilité des liquides permettant ainsi la formation de films très orientés. Les films obtenus ont l'avantage d'offrir tout un éventail de propriétés anisotropes très intéressantes (en particulier la mobilité des porteurs). La synthèse de matériaux à base du chromophore de l'ovalène permettra d'obtenir des transporteurs de type p fortement absorbants. Pour les matériaux de type n, la synthèse de benzopérylène-carboximides et coronène-carboximides est actuellement à son début. L'auto-organisation des matériaux en solution et en film mince est étudiée par diffusion de la lumière, diffraction des rayons X et microscopie polarisante.

La deuxième voie est fondée sur l'utilisation d'un film mince constitué d'un mélange le plus homogène possible de plusieurs dérivés du C₆₀. Des substituants comme des groupements oligophénylènevinylène (OPV) ou oligophénylèneéthynylène (OPE) synthétisés à l'IPCMS ont déjà été utilisés. Cette approche moléculaire permet d'établir une relation structure/activité en faisant varier la structure du système fullerène-donneur pour en moduler ses propriétés électroniques. Dans ce but, la synthèse de molécules C₆₀-donneur avec des propriétés cristal liquide apparaît comme prometteuse.

Les cellules photoélectriques sont réalisées et caractérisées au LGET (UMR 5004). Les molécules discotiques (donneur et accepteur) sont successivement déposées par sublimation sous vide sur un substrat d'ITO. Les films de polymères sont obtenus par centrifugation d'une solution sur le substrat d'ITO. Les techniques de mesure mises en place au LGET permettent de caractériser les paramètres importants tout au long des étapes du processus de conversion (du photon jusqu'à la charge électrique sur l'électrode).

Le traitement de l'énergie fournie par les cellules nécessite la réalisation de micro-convertisseurs statiques sur substrat verre. Actuellement, les verrous technologiques se situent au niveau de la réalisation d'éléments passifs de stockage intégrés. Les travaux se concentrent sur l'étude et la réalisation d'inductances de faibles valeurs. Une étude théorique et analytique de l'influence de la forme de la bobine sur le comportement fréquentiel de l'inductance et de la résistance, a montré qu'une forme circulaire de la bobine engendrait une augmentation du facteur de qualité et de la fréquence de résonance. Des simulations ont été conduites à l'aide de l'outil de CAO dédié Microsystèmes, Coventor. La réalisation d'inductances sur substrat de verre a été ensuite entreprise. Cette phase du projet s'est basée sur une expérience de deux ans acquise par notre équipe sur l'utilisation de nouvelles résines épaisses, permettant un bon moulage de l'inductance ainsi qu'une mise au point d'une méthode de dépôt et de croissance de cuivre, afin de réaliser les conducteurs les plus réguliers et les moins rugueux possibles.

Hy - TAG

Caractérisation, modélisation, simulation de la combustion de mélanges d'hydrocarbures enrichis en hydrogène pour des applications turbines à gaz



Responsable scientifique : Iskender GOKALP

GÖKALP Iskender, Laboratoire de Combustion et Systèmes Réactifs, 1C avenue de la recherche scientifique, 45071 ORLEANS Cedex 2
BOUKHALFA Abdelkrim, Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochie, CORIA - Campus du Madrillet, Avenue de l'Université, 76801 ST ETIENNE DE ROUVRAY
CHAMPION Michel, Laboratoire de combustion et Détonique, ENSMA, Téléport 2, 1 avenue Clément Ader, BP 40, 86961 FUTUROSCOPE Cedex
DUROX Daniel, Ecole Centrale de Paris, Laboratoire d'Energétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion, Grande voie des Vignes, 92290 CHATENAY MALABRY

Le projet Hy-TAG a pour objectif d'améliorer les bases de connaissances pour l'utilisation efficace des mélanges d'hydrocarbures et d'hydrogène dans les turbines à gaz pour la co-génération de l'électricité et de la chaleur. L'utilisation des mélanges hydrogénés permettrait de réduire significativement l'effet de serre par les émissions de CO₂ en diminuant l'utilisation des combustibles carbonés. L'addition de l'hydrogène, par exemple au gaz naturel, permettrait de faire fonctionner les turbines à gaz dans des régimes de combustion très pauvres afin de diminuer les émissions des NO_x. Des mélanges de combustibles gazeux issus de la gazéification de la biomasse et contenant du CH₄, du H₂ mais aussi du CO₂ sont également à considérer. Quatre laboratoires de combustion du CNRS contribuent au projet Hy-TAG. Des liens très étroits seront établis avec les constructeurs de turbines à gaz, notamment avec TURBOMECA, ainsi que l'IFP. Le projet Hy-TAG s'articule autour des études expérimentales et de modélisation sur la cinétique chimique de la combustion des mélanges d'hydrocarbures additionnés d'hydrogène (et du CO₂), les vitesses de propagation laminaires et turbulentes de ces mélanges, leurs régimes de stabilisation, leur structure instantanée et moyenne. Une confrontation continue sera assurée entre les expériences de laboratoire et la modélisation et la simulation numérique dans le but de faire avancer la modélisation de la combustion dans ce domaine, notamment en faisant ressortir les effets de la composition du mélange, de la pression, de la température de l'air de prémélange, de la richesse globale ainsi que de la structure de la turbulence.



GREVILLOT Georges, ENSIC, Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, 1 rue Grandville, BP 451, 54001 NANCY Cedex

GUILARD Roger, Faculté des Sciences Gabriel, Laboratoire d'Ingénierie Moléculaire pour la Séparation et les Applications des Gaz, 6 Bd Gabriel, 21100 DIJON

BOUALLOU Chakib, Ecole des Mines de Paris, Centre d'Energétique, 60 Bd St Michel, 75272 PARIS

AGRINIER Pierre, Université Denis Diderot Paris VII, Physico-chimie des fluides géologiques, Institut de Physique du Globe de Paris, Tour 54-64, 2 place Jussieu, BP 089, 75251 PARIS Cedex 05

Ce projet a pour objectif la conception et l'évaluation de procédés de capture du dioxyde de carbone à partir d'émissions post-combustion, qui représentent la quasi-totalité des émissions en France, basés sur des groupements fonctionnels (ligands) originaux. Plus spécifiquement, des matériaux hybrides nanostructurés combinant chimisorption et physisorption du CO₂ seront élaborés, ainsi que des polymères de coordination basés sur des motifs bipyridine ou carboxylate.

Une mise en œuvre de ces molécules ou produits dans des procédés d'absorption gaz-liquide et d'adsorption sera réalisée et les performances de séparation vis-à-vis d'un mélange CO₂/N₂ seront comparées. La modélisation des procédés sera développée sur la base d'essais de laboratoire, afin d'aboutir à une analyse du coût énergétique global. L'incidence de la composition globale du mélange au sortir du procédé de capture sur le devenir des composés lors d'une séquestration géologique sera abordée. Au final, outre le développement potentiel d'un procédé de capture original, une vision plus réaliste de la problématique capture post-combustion et séquestration est attendue de cette collaboration entre chimistes, spécialistes de procédés et géologues, créant en outre un pôle de compétences.

MAELEVA

Matériaux membranaires pour la production d'hydrogène par électrolyse de la vapeur fournie par un réacteur HTR.



Responsable scientifique : Anne JULBE

Mme JULBE Anne, IEM (Institut Européen des Membranes)
M. TAKENOUTI Hisasi, LISE (Lab. des Interfaces et des Systèmes Electrochimiques)
M. GRENIER Jean-Claude, ICMCB (Institut de Chimie de la Matière Condensée)
Mme SALA Béatrice, Framatome-ANP
M. PY Jean-Pierre, Framatome-ANP

L'électrolyse de l'eau à haute température est une technique élégante et non polluante de production de H₂, vecteur énergétique du futur. Ce procédé, considéré comme attractif depuis plus de 20 ans, a toujours été limité par des problèmes de tenue des matériaux de structure dans les conditions de fonctionnement au-delà de 800°C. Les récents développements dans le domaine de la chimie des céramiques conductrices ioniques, des matériaux membranaires et des méthodes électrochimiques de caractérisation permettent de considérer cette approche sous un angle nouveau. Les travaux envisagés dans ce projet mettent à profit de façon pertinente les compétences spécifiques et complémentaires des partenaires pour la réalisation et l'évaluation d'une cellule d'électrolyse à conduction protonique, à partir de matériaux de composition, structure, texture et architecture contrôlées. L'objectif est d'abaisser la température de fonctionnement dans la gamme 500-800°C. Le développement de ce type de système nécessite en effet un savoir-faire et des compétences pluridisciplinaires en chimie du solide, des matériaux et des membranes, en métallurgie, ainsi qu'en électrochimie, tant pour la caractérisation que pour la mise en œuvre de l'électrolyseur. L'appui d'un industriel tel que FRAMATOME-ANP renforce l'intérêt de notre approche et permet de valoriser les compétences de trois laboratoires du CNRS auprès d'un groupe important dans le domaine de l'énergie.

DISTOCLIM

Mise au point et étude d'un frigoporteur diphasique à température positive utilisable en climatisation. Propriétés de transport et stockage.



Responsable scientifique : André LALLEMAND

André LALLEMAND, Philippe HABERSCHILL, Jean-Dominique CHANTELOT + étudiant de DEA + doctorant, CETHIL – Centre de Thermique de Lyon (UMR 5008)
Jean-Pierre DUMAS, Youssef ZERAOULI, Jean-Pierre BEDECARRATS, Stéphane GIBOUT + étudiant DEA, LaTEP – Laboratoire de Thermique, Énergétique et Procédés, Pau (EA 1932)
Laurent ROYON, Gérard GUIFFANT, Pierre COLINARD, François TRINQUET (doctorant boursier ACI), LBHP – Laboratoire de Biorhéologie Hydrodynamique Physico-chimique, Paris (UMR 7057)
Pierre MERCIER, Frank CHIARUCCI, Alain MARECHAL + étudiant DRT, LETH-GREThE-CEA Laboratoire des Echangeurs Thermiques, Grenoble

La climatisation des locaux tertiaires et résidentiels est appelée à un développement important, ce qui induira inévitablement une surconsommation d'énergie, de type électrique essentiellement. De plus, cette consommation présente un caractère parfois périodique, le plus souvent aléatoire, mais en aucun cas constant. Cela entraîne, pour des installations classiques, d'une part, de surdimensionner les machines frigorifiques de production d'eau glacée afin qu'elles permettent de fournir les pointes de puissance, d'autre part, des fluctuations fortes dans les consommations énergétiques.

Afin de pallier ces problèmes, les grosses installations peuvent être équipées de cuves de stockage de l'eau glacée, voire, pour minimiser la taille des stocks, de cuves contenant des matériaux à changement de phase encapsulés ou non. Si le stockage par chaleur sensible permet de stocker de la chaleur à une température proche de celle d'utilisation, il nécessite de travailler sur de grands volumes et avec des gradients thermiques. L'emploi de la glace comme matériau stockeur présente l'intérêt de diminuer la taille du stock, mais induit un stockage à 0 °C, soit à une température basse qui grève les performances de la machine frigorifique. Les MCP encapsulés laissent un certain choix dans le niveau de température de stockage. Cependant, les transferts thermiques dans les cuves de stockage de ces MCP peuvent poser problème quant aux puissances de stockage et de déstockage.

Le système de distribution et de stockage de froid proposé rassemble la plupart des avantages mentionnés ci-dessus. Il permet un stockage à une température proche de celle d'utilisation et associe chaleur latente et chaleur sensible. Les puissances de stockage et de déstockage ne dépendent plus que des débits du frigoporteur. Dans les échangeurs de chaleur, les évolutions de la température du fluide sont faibles (chaleur latente) et les gradients aux parois sont minimisés du fait de meilleurs coefficients d'échanges. Les inconvénients résident dans deux points essentiels : l'augmentation des pertes de charge dans les écoulements et la limitation nécessaire de la quantité de MCP (30 % environ de l'ensemble du frigoporteur). Cependant, des frigoporteurs diphasiques adaptés à la climatisation sont inexistantes actuellement.

Les laboratoires qui présentent ce projet de recherche ont participé à des recherches de base sur les caractéristiques et le comportement rhéologique et thermique de frigoporteurs diphasiques adaptés à la production de froid négatif. Un nouveau fluide a été étudié : le coulis de glace stabilisé (eau retenue dans un gel ultra poreux en suspension dans de l'huile silicone) dont la température de changement de phase est de 0 °C. Dans ce projet, il s'agit de concevoir et de caractériser des matériaux semblables mais utilisables dans un tout autre domaine, celui de la climatisation.

Les grandes lignes du projet peuvent être résumées comme suit :

- recherche d'un produit candidat formé d'un ensemble de trois éléments : un gel très poreux pouvant contenir et retenir un MCP et le fluide vecteur ; fabrication de ce produit en quantité suffisante pour conduire les diverses études ;
- caractérisation de ce produit sur le plan thermophysique (propriétés thermodynamiques, rhéologiques, thermiques) ;
- étude des propriétés de transfert du produit dans diverses situations (pertes de charge, coefficients de transferts thermiques locaux et globaux) ;
- caractéristiques de stockage du frigoporteur ;
- étude d'un prédimensionnement d'un système industriel.

Ces études seront conduites tant sur un plan théorique que sur un plan purement expérimental. Des modélisations de points particuliers seront faites, notamment en ce qui concerne l'aspect stockage. En phase préliminaire et parallèlement à la mise au point et la caractérisation du produit on développera un logiciel d'étude comparative du fonctionnement de systèmes classiques de climatisation et d'un système à frigoporteur diphasique et stockage intégré.

BIOMASTERS

Maîtrise de la structure, des conditions thermiques et de la réactivité pour une sélectivité donnée.



Responsable scientifique : Jacques LEDE

J. LEDE, Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, Nancy
A. BOUDET, Laboratoire des Surfaces Cellulaires et Signalisation chez les Végétaux, Toulouse
S. SALVADOR, Laboratoire de Génie des Procédés et des Solides Divisés, Albi
A. KIENNEMANN, Laboratoire Matériaux, Surfaces, Procédés pour la Catalyse, Strasbourg
J.V. WEBER, Laboratoire de Chimie et Applications, St Avold

De par sa capacité unique à pouvoir réaliser recyclage, captage et stockage du CO₂, la biomasse est une source d'énergie renouvelable ne conduisant à aucune accumulation de gaz à effet de serre. Elle peut être transformée à haute température dans diverses filières de pyrolyse-gazéification avec plusieurs objectifs possibles : énergie, bio-carburants liquides, H₂, ... L'optimisation de ces filières se heurte à un certain nombre de verrous scientifiques et technologiques, notamment au niveau du réacteur de transformation thermique. La littérature montre que son optimisation repose souvent sur des lois cinétiques de décomposition de la biomasse établies au laboratoire dans des conditions thermiques très différentes de celles existant dans le réacteur réel. En outre, ces lois ne concernent généralement qu'un type de biomasse donnée. L'objectif du projet BIOMASTERS est de permettre, par une démarche systématique, de prédire le comportement thermique de biomasses réelles à partir de celui de chacun de ses principaux éléments : cellulose, lignine, hémicellulose. Le travail fondamental sera effectué dans des conditions thermiques (flux de chaleur et/ou températures imposées) couvrant l'ensemble des situations rencontrées dans la plupart des réacteurs réels (lits fixes, fluidisés, entraînés, ablatifs, vortex, ...).

Un paramètre important sera aussi d'étudier l'influence de catalyseurs volontairement ajoutés.

La complémentarité et la multidisciplinarité des équipes (Sciences Chimiques, Sciences pour l'Ingénieur et Sciences de la Vie) sont des atouts très favorables à la réussite du projet.

COCORAPHA

Développement et Validation d'une méthodologie pour modéliser et simuler les transferts thermiques couplés convection-rayonnement-conduction dans l'habitat : établissement d'un modèle physique minimal



Responsable scientifique : **Patrick LE-QUERE**

LE QUERE Patrick, LIMSI, Campus d'Orsay, Bâtiment 508, BP 133, 91403 ORSAY
PENOT François, ENSMA, Laboratoire d'Etudes Thermiques, avenue Clément Ader, BP 40109, 86961 FUTUROSCOPE
SOUFIANI Anouar, Ecole Centrale de Paris, Laboratoire d'Energétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion, Grande voie des vignes, 92295 CHATENAY-MALABRY
JOUBERT Patrice, Université de la rochelle, Laboratoire d'Etudes des Phénomènes de Transferts Appliqués au Bâtiment, Pôle Scientifique et Technologique, avenue Michel Crépeau, 17 042 LA ROCHELLE
LAURIAT Guy, Université de Marne-La-Vallée, Laboratoire d'Etudes des Transferts d'Energie et de Matière, Bâtiment Lavoisier, 5 Bd Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 MARNE LA VALLEE Cedex 2

Le projet a pour but de développer et valider une méthodologie numérique permettant de modéliser et simuler les transferts thermiques couplés convectifs-radiatifs-conductifs dans le contexte de la thermique de l'habitat. La spécificité de la démarche tient en la mise en synergie de compétences reconnues au plan national et international en convection naturelle transitionnelle et turbulente, détermination des échanges radiatifs des gaz réels, à la fois du point de vue des méthodes numériques et au plan expérimental. L'objectif de ce travail est multiple :

- développer une plate forme logicielle disposant de capacités prédictives réelles dans le contexte de la thermique de l'habitat, c'est à dire capable de modéliser et simuler de manière précise et les écoulements et transferts incluant la convection naturelle et mixte en régime turbulent et transitionnel, et les transferts radiatifs de l'air ambiant, et les couplages pariétaux nécessaires ;
- obtenir des données expérimentales précises et fiables dans des conditions modèles pertinentes par rapport au contexte applicatif envisagé ;
- quantifier l'impact des diverses sources d'incertitudes de modélisation sur les sorties de la chaîne de simulation de manière à hiérarchiser l'importance des ingrédients constitutifs de la modélisation ;
- déterminer, à partir de ces outils numériques et des données expérimentales, quel est le niveau de modélisation (modèle physique minimal) pertinent dans le contexte applicatif envisagé (2D/3D, niveau de finesse de description géométrique, conditions aux limites thermiques, validité de l'hypothèse de Boussinesq, rayonnement pariétal, rayonnement des gaz, propriétés spectrales, ...).

TGV-SICOMAT

Couches minces de silicium déposées à très grande vitesse pour le photovoltaïque dans l'habitat



Responsable scientifique : Pere ROCAS I CABARROCAS

ROCA i CABARROCAS Pere, Ecole Polytechnique, Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces, Route de Saclay, 91128 PALAISEAU
KLEIDER Jean Paul, Ecole Supérieure d'Electricité, Laboratoire de Génie Electrique de Paris, 11 rue Joliot Curie, Plateau de Moulon, 91192 GIF SUR YVETTE
MEAUDRE Robert, Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire de Physique de la Matière Condensée et Nanostructures, Bâtiment Léon Brillouin, 43 Bd du 11 novembre 1918, 69622 VILLEURBANNE

De par leur facilité d'intégration et la possibilité de les déposer sur des substrats variés, les couches minces de silicium déposées par voie plasma sont les éléments idéaux pour la réalisation de dispositifs photovoltaïques intégrés à l'habitat. Des rendements de 15% sont atteignables pour des cellules tandem comportant une cellule fenêtre à grand gap à base de silicium amorphe ou polymorphe et une cellule arrière à petit gap à base de silicium microcristallin. Mais outre le rendement, le coût reste l'élément déterminant qui limite le développement de cette filière. Pour le réduire, l'augmentation de la vitesse de dépôt est un des moyens les plus attrayants. Le but du projet est de produire des couches minces de silicium par des procédés plasma micro-ondes à basse température (< 300 °C) avec des vitesses de 10 à 50 fois supérieures à celles utilisées aujourd'hui pour la fabrication des modules à base de silicium amorphe (~ 0,1 nm/s).

Les matériaux polymorphe et microcristallin ainsi développés seront intégrés dans des structures PIN ou NIP dans une première phase et dans des structures tandem dans une deuxième.

HYDROLUX

Photo production d'hydrogène par la technologie de l'hydrogénase recombinante



Responsable scientifique : Marc ROUSSET

ROUSSET Marc, Bioénergétique et Ingénierie de Protéines, IBSM, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 MARSEILLE Cedex 20
COURNAC Laurent, CEA Cadarache, Laboratoire d'Ecophysiologie de la Photosynthèse, DSV/DEVM, Bâtiment 161, 13108 SAINT PAUL LEZ DURANCE Cedex
GUIGLIARELLI Bruno, Bioénergétique et Ingénierie de Protéines, IBSM, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 MARSEILLE Cedex 20
VOLBEDA Anne, CEA, Laboratoire de Cristallographie et Cristallogenèse des Protéines, IBS J.P. , Ebel, 41 rue Jules Horowitz, 38027 GRENOBLE Cedex 1

Le but de cette étude est de comprendre la chimie de coordination qui est à l'œuvre dans les hydrogénases, et notamment de déterminer quelles sont les bases moléculaires de la sensibilité à l'oxygène des hydrogénases à [NiFe]. Ces connaissances offriront un large éventail d'applications, dont le but principal de ce projet qui est de rendre l'hydrogénase de *Synechocystis* moins sensible à l'inactivation par l'oxygène, permettant ainsi de coupler la photolyse de l'eau à la production d'hydrogène. Ces connaissances représenteront également une source d'inspiration pour la synthèse de nouveaux catalyseurs inorganiques à base de nickel, et les hydrogénases recombinantes améliorées qui auront été produites et étudiées dans ce projet seront évaluées dans la perspective de leur utilisation dans des procédés de biotechnologie.

SPECIMOUSSE

Optimisation des transferts dans les unités fonctionnelles d'une pile à combustible



Responsable scientifique : Frédéric TOPIN

Topin Frédéric, IUSTI Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels, Marseille
Marvillet Christophe, GREThE Groupement de Recherche sur les Echangeurs Thermiques, Grenoble
Miscevic Marc, Laboratoire d'Energétique, Toulouse
Clifton Michael, LGC Laboratoire de Génie Chimique, Toulouse

SPECIMOUSSE a pour objectif la déclinaison du matériau mousse pour son utilisation dans les systèmes autonomes de production d'énergies électrique et thermique basés sur la technologie pile à combustible du type PEM avec reformeur à carburant liquide.

Les mousses métalliques sont des structures tridimensionnelles particulières dont l'utilisation est envisagée pour de nombreuses applications. Développées originellement pour servir d'électrodes dans les accumulateurs électrochimiques, ces mousses sont aujourd'hui abondamment citées comme permettant d'obtenir des gains substantiels en termes d'intensification des transferts de chaleur, des mélanges et des réactions chimiques en particulier. Des études antérieures ont permis de mettre en évidence des possibilités importantes d'optimisation pour chacune de ces applications. L'intérêt majeur de l'utilisation des mousses réside dans l'intégration multifonctionnelle dans le design industriel, puisqu'elles peuvent assurer simultanément un rôle mécanique, thermique, catalytique, ...

Néanmoins, les caractérisations thermiques et hydrodynamiques de ces matériaux, ainsi que l'étude de l'impact de leur géométrie sur les propriétés de transport restent limitées. Les travaux en cours portent sur la caractérisation de l'impact de la morphologie de ces structures poreuses, sur leurs propriétés de transport et la détermination des lois d'écoulement, de mélange et de transfert de chaleur (avec et sans changement de phase liquide-vapeur).

SPECIMOUSSE regroupe quatre laboratoires, spécialisés dans le domaine des transferts, aux thématiques complémentaires :

- le GREThE : thermo-hydraulique des échangeurs, tests de prototypes industriels, intégration
- le LE : approches système et changement de phase
- l'IUSTI : morphologie, propriétés thermophysiques et ébullition
- le LGC : méthodes numériques et aspects chimiques.

Ce travail est centré sur la maîtrise des transferts thermiques et massiques dans les éléments fonctionnels d'une pile à combustible (reformeurs, purificateurs, échangeurs thermiques, etc.). L'utilisation de matériaux cellulaires ouverts à forte porosité, optimisés pour chacune des fonctions, permettra la réalisation de systèmes compacts, multifonctionnels et directement intégrables. Les verrous scientifiques concernent :

- la compréhension des transferts de chaleur et de masse dans ces matériaux et de l'impact de la structure de la matrice poreuse (topologie) sur ces phénomènes.
- le développement d'outils d'analyse de la morphologie de ces matériaux cellulaires ainsi que de leurs propriétés de transport et d'écoulements.

Au plan applicatif, on s'attachera à l'optimisation des textures de matériaux suivant les fonctions envisagées (échanges thermiques, mélange, électrochimie, aspects multifonctionnels) en vue de leur mise en œuvre dans une PACo.

Enfin, un prototype compact regroupant les éléments fonctionnels (hors membrane) d'un système PACo sera réalisé. Ce prototype assurera simultanément l'alimentation en hydrogène de la pile et le contrôle thermique. Les composants évaporateurs, reformeur et récupérateur, à base de mousse métallique, seront plus particulièrement étudiés.

L'élaboration de systèmes pile à combustible ainsi que leur utilisation rationnelle passe par une approche intégrée, prenant en compte l'ensemble de la chaîne des processus physico-chimiques mis en jeu, du stockage du carburant à l'utilisation de l'électricité (réduction des coûts, maîtrise des dépenses énergétiques, ...) d'une part, et par la maîtrise des transferts de chaleur et de masse au sein du système d'autre part.



VALENTIN Gérard, ENSIC, Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, BP 451, 1 rue Grandville, 54001 NANCY Cedex
KAUFFMANN Jean-Marie, UTBM, Laboratoire de recherche en Electronique, Electrotechnique et Systèmes, Bâtiment F, Rue Thierry Mieg, 90010 BELFORT Cedex

Cette phase de démarrage du projet a consisté à mettre au point les méthodes de vieillissement de cœurs de piles à combustible et, conformément au plan prévisionnel, les travaux réalisés à ce jour sont le fait du L2ES à Belfort.

1. Méthodologie

Les essais d'endurance sont effectués sur des stacks, fournis par ZSW (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff- Forschung). Ce sont des piles à électrolyte polymère (Gore), de surface de EME de 100 cm². L'assemblage est formé de trois cellules ; ce choix a été guidé par les raisons suivantes :

- travailler sur un stack plutôt que sur une cellule individuelle permet de se rapprocher des conditions réelles de fonctionnement pour des applications de puissance (en particulier, du point de vue thermique où la dissipation des cellules voisines a un impact non négligeable) ;
- limiter cependant le nombre de cellules permet un fonctionnement plus stable, car moins dépendant des aléas d'alimentation en réactifs (pertes de charge, bouchon d'eau, limitation en pression, ...) ;
- l'investigation par spectroscopie d'impédance nécessite des niveaux de tension assez faibles (inférieurs à 10 V) ;
- les essais pouvant aller jusqu'à la destruction, les cellules en test sont des « consommables » au coût non négligeable.

Les stacks sont maintenus en charge, de manière continue. Des arrêts périodiques sont néanmoins nécessaires afin, d'une part, de quantifier l'évolution des performances des stacks par le relevé de courbes de polarisation pour différentes conditions de fonctionnement, et d'autre part, d'évaluer certains paramètres caractéristiques par la mesure d'un spectre d'impédance.

2. Résultats d'essais d'endurance en un point de fonctionnement (L2ES)

Les travaux entrepris jusqu'alors s'articulent de la manière suivante :

- Définition des conditions expérimentales pour les essais : surstoéchiométrie ; densité de courant, pression, température et niveau d'humidification, etc.
- Présentation des courbes tension – courant en fonction du temps, et la représentation 3D mise au point permet la mise en évidence visuelle du vieillissement
- Spectroscopie d'impédance à densité de courant imposée, selon l'âge des assemblages électrode-membrane-électrode (EME), afin de confirmer et de préciser les observations faites à partir de la courbe tension-courant.

Les premiers résultats obtenus montrent l'apparition nette du vieillissement de l'assemblage de l'EME après 300-400 heures à une densité de 0,5 A cm⁻². Il s'agira de préciser ce point, puis par la suite d'en trouver les causes.

3. Perspectives

Les montants alloués à la réalisation de l'ACI représentent environ 40 % des montants demandés. Pour les deux laboratoires partenaires, l'embauche d'un chercheur post-doctoral est exclue, ce qui nous oblige à nous ré-organiser en interne. Un retard sur la programmation des expériences est probable malgré l'implication à temps partiel des personnels permanents.

Par ailleurs, dans les prochains mois, le L2ES va poursuivre ses travaux sur le vieillissement, alors que le LSGC se consacrera à la réalisation d'un banc expérimental et à la mise au point de méthodes électrochimiques pour la mise en évidence des causes des phénomènes de vieillissement.



Direction : Monique LALLEMAND
CETHIL - INSA, 20, avenue A. Einstein - 69621 Villeurbanne cedex
☎ : 04 72 43 81 54 - Télécopie : 04 72 43 60 10 - e-mail : monique.lallemant@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.insa-lyon.fr>