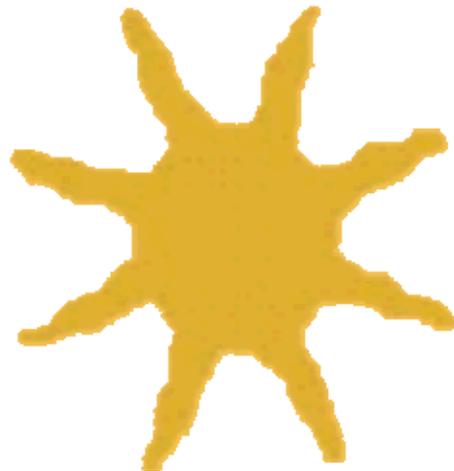


ENSMA Poitiers 24, 25 et 26 novembre 2003

Programme interdisciplinaire du CNRS

Action Concertée Énergie

CNRS – MRNT



Colloque 2003



Action Concertée ÉNERGIE
Directeur : Bernard SPINNER

Direction de l'Action Concertée Énergie
Rambla de la Thermodynamique
Tecnosud
66100 Perpignan
carnot@univ-perp.fr

Évolution du Programme ÉNERGIE

Le programme interdisciplinaire Énergie du CNRS mis en place en avril 2002 a intégré les contributions du MRNT et de la DGA en février 2003 ; ainsi,

L'ACTION CONCERTÉE ÉNERGIE CNRS-MRNT AVEC LE SOUTIEN DE LA DGA

a pu lancer un appel d'offre comprenant des PR (Projets de Recherche de 2/3 ans impliquant 3 à 5 équipes), et des PE (Projets Exploratoires, de 1 an, impliquant 1 à 2 équipes), et financer les deuxièmes années des PRI (Projets de Recherche Intégrés) et GAT (Groupes d'Analyse Thématique) lancés en 2003.

La mise en place de 3 plates formes scientifiques a été effectuée grâce au soutien du SPI.

Un **Conseil Scientifique** et un **Comité de Pilotage** analysent les demandes de soutien aux projets, nomme des experts extérieurs et classe les projets en fonction des résultats fournis par les experts. Le Comité de Pilotage oriente, avec la Direction de l'AC, les axes de recherche prioritaires à développer, à court / moyen terme (10 à 20 ans) et à moyen / long terme (20/50 ans) en fonction de la politique nationale (cf. le Débat sur les Énergies de cette année 2003) et de la préparation et des futures directives du Débat de l'Assemblée Nationale prévu fin 2003 ou début 2004.

Les orientations et les choix des stratégies énergétiques de diverses nations comme les USA, GB, RFA, Canada, sont analysés et permettent la mise en place d'une politique de recherche de l'AC, se situant en complément par rapport aux appels d'offre de l'Europe, et des réseaux ou programmes comme PACo, le PREDIT, et ceux issus de l'ADEME.

En ce qui concerne le court / moyen terme, la participation des industriels est souhaitée, avec prise souhaitable de brevets.

Pour le moyen / long terme, l'identification des verrous doit être claire : les objectifs scientifiques doivent être énoncés et justifiés pour atteindre les objectifs permettant de lever ces verrous ; la participation (hors budget) aux futurs projets d'équipes non françaises reconnues est souhaitable.

Afin de contribuer efficacement au Débat Gouvernemental de la fin 2003, la rédaction **d'un livre blanc** a été demandée à la Direction de l'AC : la contribution des GAT est attendue pour le 10 décembre au plus tard.

Ainsi, les orientations de la recherche de l'AC pouvant privilégier 4 axes principaux :

- vecteur hydrogène et électricité,
- confort dans l'habitat intégrant les EnR et la socio-économie,
- la chaîne du CO₂ depuis la biomasse, dans la combustion, jusqu'à la capture et la séquestration,
- le nucléaire du futur,

seront débattues lors de ce colloque, privilégiant les discussions nécessairement interdisciplinaires de tous les participants.

La mise en place dès 2004 **d'Écoles Thématiques** pour chercheurs sur ces axes sera soutenue, comme celle de **l'École ÉNERGIES & RECHERCHES**, pour les doctorants des équipes sélectionnées par l'AC.

B. Spinner
Novembre 2003

GAT et PRI

1. Biomasse

GAT 1 <i>Biomasse pour l'énergie</i>	x
PRI 1.1 <i>Biocarburant éthanol</i>	p. 7

2. Photovoltaïque

GAT 2 <i>Cellules photovoltaïques du futur</i>	x
PRI 2.1 <i>Recherches de base en photovoltaïque : nouveaux matériaux</i>	p. 8

3. Piles à combustibles

GAT 3 <i>PACo et leur gestion</i>	x
PRI 3.1 <i>Cœurs de Piles A Combustible à Electrolyte Membrane (Co-PACEM)</i>	p. 9

4. Production et stockage d'hydrogène

GAT 4 <i>Production et stockage d'hydrogène</i>	x
PRI 4.1 <i>Production d'hydrogène par des énergies renouvelables</i>	p. 10
PRI 4.2 <i>- Matériaux pour le stockage de l'hydrogène - Stockage de l'hydrogène basse pression dans des hydrures métalliques</i>	p. 11 x

5. Gestion de l'électricité

GAT 5 <i>Réseaux et stockage de l'électricité</i>	x
PRI 5.1 <i>Étude des transferts d'énergie dans les réseaux</i>	p. 12
PRI 5.2 <i>Électronique de Puissance Haute Tension</i>	p. 13

6. Habitat

GAT 6 <i>Apport des énergies renouvelables et maîtrise des échanges dans l'habitat</i>	p. 5
PRI 6.1 <i>Froid solaire</i>	p. 14
PRI 6.2 <i>Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques thermiques au bâti</i>	p. 15

7. Solaire thermique

GAT 7 <i>Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration</i>	x
PRI 7.1 <i>Production d'hydrogène par énergie solaire "Hysol"</i>	p. 16

8. Thermique

GAT 8 <i>Optimisation des échanges dans les procédés industriels</i>	x
PRI 8.1 <i>Communauté d'Analyse et de Recherche des Nouvelles Orientations de la Thermodynamique (Carnot)</i>	p. 17

PRI 8.2 <i>Microéchangeurs</i>	p. 18
--	-------

9. Gestion du froid et de la chaleur

GAT 9 <i>Production, stockage et transport du froid et de la chaleur</i>	x
PRI 9.1 <i>Réseaux de distribution de froid</i>	p. 19
PRI 9.2 <i>Cycles thermochimiques transport chaleur et froid</i>	x

10. Combustion et capture du CO₂

GAT 10 <i>Combustion et capture du CO₂</i>	x
PRI 10.1 <i>Capture par adsorption de CO₂ dans des gaz de centrales thermiques et leur injection en gisement de pétrole</i>	p. 20

11. Le nucléaire du futur

GAT 11a <i>Nucléaire du futur</i>	x
GAT 11b <i>Fusion thermonucléaire contrôlée</i>	x

12. Socio-économie

GAT 12 <i>Prospective socio-économique dans le secteur de l'énergie</i>	x
---	---

Projets de Recherche

PR 1.2 <i>Hydrocar</i>	x
PR 1.3 <i>Hymet</i>	x
PR 1.4 <i>H2-Therm</i>	x
PR 1.6 <i>Sol-Hy</i>	x
PR 1.7 <i>Stockage du vecteur hydrogène</i>	p. 22
PR 2.1 <i>Échangeurs Multi-fonctionnels</i>	p. 23
PR 2.3 <i>Refroidissement diphasique</i>	x
PR 2.4 <i>Spreaders-Pemfc</i>	p. 24

PR 2.6 <i>Thermo-Eco</i>	x
PR 2.8 <i>Transport de Froid</i>	p. 25
PR 2.9 <i>Varitherm</i>	p. 26
PR 3.2 <i>Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques thermique au bâti</i>	x
PR 4.1 <i>Copifac</i>	p. 27
PR 4.3 <i>Plasmhyrad</i>	x
PR 5.5 <i>Syngaz-GTL-HCCI</i>	x
PR 6.1 <i>Caphybrid</i>	p. 28
PR 6.2 <i>Caprys</i>	p. 29
PR 6.3 <i>Coulis d'Hydrates</i>	x
PR 6.6 <i>HTP-Stock</i>	x
PR 7.2 <i>Microénergie</i>	x
PR 8.1 <i>ENEC 2050</i>	p. 30
PR 8.2 <i>ETHEL</i>	p. 31

Projets Exploratifs

PE 1 <i>Oxti-photobatterie</i>	p. 33
PE 2 <i>Réseaux et stockage de l'électricité</i>	x
PE 3 <i>Searev</i>	p. 34
PE 5.1 <i>Biocogaz</i>	p. 35
PE 5.2 <i>Électricité verte</i>	x
PE 5.5 <i>Plasmasol</i>	x
PE 5.7 <i>Silicium solaire</i>	p. 36
PE 5.8 <i>TMSR</i>	x
PE 5.10 <i>Promer</i>	p. 37

Programme

Lundi 24/11	p. 1
Mardi 25/11	p. 2
Mercredi 26/11	p. 3

LUNDI



24 NOVEMBRE

10h

Accueil à l'ENSMA

11h

Exposé introductif
de B. Spinner, Directeur du Programme.

11h20

Conférence plénière.

«Accélération du changement technologique et
mutation des systèmes énergétiques : les leçons
de l'histoire». - D. Finon

12h30 : Déjeuner

14h

Thématique :
Vers l'habitat zéro énergie

Président de séance, M. Most.

- **PRI 2.1** : Recherches de base en photovoltaïque
- **PRI 6.1** : Froid solaire
- **PRI 6.2** : Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques thermiques au bâti
- **PRI 9.1** : Réseaux de distribution de froid
- **PRI 8.1** : Communauté d'Analyse et de Recherche des Nouvelles Orientations de la Thermodynamique (Carnot)

16h05 : Pause

16h30

Discussion animée par P. Matarasso
Intégrant un exposé des responsables de GAT
(deux transparents maximum).

- **GAT 2** : Cellules photovoltaïques du futur
- **GAT 6** : Habitat
- **GAT 9** : Gestion du froid et de la chaleur

19h30 :
Apéritif accueil
à l'Hôtel de Ville

19h30 : Soirée libre

MARDI



25 NOVEMBRE

8h

Séance de posters pour les PR 2003.

9h30

Thématique :

Des ressources fossiles et biomasse, à la combustion : les sources d'émission de CO₂

Président de séance, Mme Lallemand

- **PRI 1.1** : Biocarburant éthanol
- **PRI 8.2** : Microéchangeurs
- **PRI 10.1** : Capture par adsorption de CO₂ dans des gaz de centrales thermiques et leur injection en puits de pétrole

10h45 : Pause

11h05

Discussion animée par D. Finon

Intégrant un exposé des responsables de GAT (deux transparents maximum).

- **GAT 1** : Biomasse
- **GAT 8** : Thermique
- **GAT 10** : Combustion et capture du CO₂

13h : Déjeuner

14h30

Thématique :

Le vecteur Hydrogène : production, stockage, transport et utilisation, gestion de l'électricité

Président de séance, M. Saulnier

- **PRI 4.1** : Production d'hydrogène par des énergies renouvelables
- **PRI 7.1** : Production d'hydrogène par énergie solaire «Hysol»
- **PRI 4.2** : Matériaux pour le stockage de l'hydrogène
- **PRI 3.1** : Cœur de piles à combustible à électrolyte membrane
- **PRI 5.1** : Étude des transferts d'énergie dans les réseaux
- **PRI 5.2** : Électronique de puissance

17h : Pause

17h20

Discussion animée par B. Bourgeois

Intégrant un exposé des responsables de GAT (deux transparents maximum).

- **GAT 4** : Production et Stockage d'Hydrogène
- **GAT 3** : Piles à combustible
- **GAT 5** : Gestion de l'électricité
- **GAT 7** : Solaire Thermique

20h : Dîner de Gala

MERCREDI



26 NOVEMBRE

8h

Séance de posters pour les PR 2003

9h30

Thématique :
Nucléaire

Séance présidée et animée par E. Fabre.

- **GAT 11a** : Nucléaire du futur
- **GAT 11b** : Fusion thermonucléaire contrôlée

10h40 : Pause

10h55

Les projets exploratoires

Exposé des responsables de PE (trois transparents maximum, de 5 minutes).

11h40

Discussion animée par D. Finon et P. Matarasso

Le rôle de la Socio-économie.

12h50

Synthèse

Vers quel positionnement du CNRS à moyen terme (20 ans) et à long terme (50 ans) sur la problématique de l'Énergie ? - B. Spinner

13h : Déjeuner

Groupes d'Analyse Thématique



GAT habitat, état des lieux, prospective

Si les recherches portant sur les aspects sciences physiques sont présentes, celles portant sur les aspects économiques et sociaux sont pratiquement inexistantes dans les laboratoires universitaires, un des rares exemples trouvés dans ce dernier domaine se rapporte à la modélisation «des réticences à l'intégration des énergies renouvelables en milieu insulaire». Pour les premières, elles concernent surtout les problèmes énergétiques et thermiques. En dehors des grands organismes ou centres techniques (CSTB, GDF, EDF...) ces recherches s'opèrent dans environ 10 laboratoires associés ou CNRS ou universitaires et impliquent directement un groupe restreint de 35 à 40 personnes environ.

Ces recherches peuvent être classées dans quatre rubriques imbriquées relatives, respectivement : aux volumes intérieurs et aux ambiances ; aux enveloppes ; à l'interaction bâtiment – environnement proche et aux systèmes. Trois objectifs sont affichés : ils visent tout d'abord à améliorer les connaissances des phénomènes physiques à différentes échelles de l'habitat ; faire sauter des verrous technologiques par l'introduction de connaissances, procédés, matériaux nouveaux dans l'habitat ; contribuer à une approche globale et environnementale du problème de l'habitat.

Les recherches combinent les approches expérimentales et numériques pour maîtriser les ambiances intérieures, trouver des stratégies de contrôle de ventilation hybride ou optimiser la conception des enveloppes intégrant des composants solaires, des matériaux composites par exemple. Divers outils de simulation sont développés pour faciliter l'éco-conception des bâtiments (analyse du cycle de vie), comprendre l'impact du microclimat urbain sur le bâti (rue canyon), analyser différentes solutions de stockage intégrant le solaire.

L'intégration des énergies renouvelables dans l'habitat a été, par le passé, un échec, pourtant les enjeux sont importants, des facteurs spécifiques au contexte énergétiques français, mais aussi des aspects économiques et sociaux d'insertion et d'acceptabilité de ces technologies en sont les raisons principales. Il faudrait donc, en premier lieu, envisager des programmes de recherche destinés à comprendre et examiner les raisons de ce rejet de type sociétal, accompagnés d'études et d'analyses portant sur les verrous institutionnels empêchant la pénétration des ENR ainsi que les obstacles réglementaires (français ou européens).

Pour les recherches de type physique, les problèmes posés ne semblent pas donner lieu à de grandes questions fondamentales. Cependant, de nombreuses recherches mériteraient d'être entreprises dans nos laboratoires pour envisager des solutions particulièrement innovantes ou audacieuses et entreprendre des analyses qui ne peuvent être faites dans l'industrie du bâtiment et les organismes associés. Le sujet fédérateur pourrait porter sur la modélisation du bâtiment, intégrant les aspects énergétiques avec des bilans, la gestion, le contrôle et la commande. Ce modèle introduirait aussi une représentation de l'utilisateur avec des critères de confort et d'activités variées, ainsi que les interactions du bâti avec diverses sources d'approvisionnement ou de production d'énergie et leur intégration au bâti, les interactions avec le microclimat environnant pris à différentes échelles. Cette modélisation se déclinerait alors en suivant différentes actions complémentaires. Citons celles qui devraient permettre de comprendre et de décrire l'environnement immédiat de l'occupant pour agir dessus (contrôle actif, convection), les recherches sur la physique de l'enveloppe et concepts nouveaux (superisolants, changement de phase intégré, échanges sélectifs, effets diode, doubles peaux...). Les études permettant l'optimisation de la gestion énergétique de systèmes intégrant des dispositifs ENR et de stockage divers (géothermie, intersaisonnier...) seraient aussi nécessaires, avec la contrainte d'intégration au bâti en renouvellement (largement plus répandu que le neuf).

Projets de Recherche Intégrée



Considérant la ressource «biomasse», ce projet s'intéresse, «de la plante au bio-carburant» à l'itinéraire technologique, en considérant les facteurs de progrès pour développer un procédé pertinent devant les enjeux que présente cette filière. Il s'attache, à partir de la connaissance de la ressource à promouvoir le développement d'enzymes de dégradation/hydrolyse permettant l'obtention de sucres fermentescibles. Il considère les voies d'obtention de levures performantes par les outils de la physiologie moléculaire et de la biologie macroscopique. Il intègre la mise en œuvre de ces levures sur substrats réels dans des procédés innovants dont l'architecture, tant sur le plan de la réaction que de l'extraction, introduit des ruptures technologiques.

Volet 1 : Bases méthodologiques et stratégiques de la production de bioéthanol sur substrats non conventionnels. Coordinateur du projet : J-P Belaich UPR 9036 Bioénergétique et ingénierie des protéines (BIP) Marseille

Le développement de ce volet de recherche comprend plusieurs étapes qui pourront être réalisées en parallèle pour optimiser la production d'éthanol à partir des substrats bruts choisis dont la liste n'est pas exhaustive : paille, peuplier, eucalyptus.

La stratégie de ce volet se décompose de la façon suivante :

- Choix des enzymes les plus performantes pour rendre accessible la cellulose à l'action des cellulases
- Choix des cellulases les plus performantes pour la production de glucose
- Expression des enzymes choisies dans des levures, champignons filamenteux ou bactéries
- Amélioration des meilleures enzymes par génie génétique
- Amélioration de l'extractibilité de la cellulose par les techniques du génie génétique des plantes
- Mise en œuvre des meilleures enzymes, construction de nanoréacteurs pluri-enzymatiques.

Cinq équipes (Bélaich, UPR-CNRS 9036 ; Boudet, UMR-CNRS 5546 ; Monsan, UMR-CNRS 5504 ; Asther, INRA-Université de Provence ; Ballerini, IFP) sont impliquées dans ce volet de recherche.

Volet 2 : Bases moléculaires et dynamiques pour l'ingénierie métabolique de levures performantes pour la production d'éthanol-carburant. Coordinateur du projet : J.M. François UMR 5504 Laboratoire de Biotechnologie Bioprocédés, Toulouse

La levure *Saccharomyces cerevisiae* est l'organisme qui présente par rapport à d'autres levures ou bactéries, les meilleurs atouts génétiques et métaboliques pour répondre à l'objectif de production de fortes concentrations d'éthanol. Ce projet a pour objectif de comprendre et de maîtriser le comportement physiologique de la levure en condition de forte teneur en éthanol en engageant plusieurs actions de recherche qui peuvent être résumées selon les deux grandes lignes directrices suivantes :

- Quantifier l'efficacité métabolique fermentaire. Ceci comprend l'analyse des flux métaboliques, de l'état énergétique et de la balance rédox de la levure au cours de la fermentation, de l'efficacité du découplage entre production d'éthanol et croissance, et aussi de quantifier l'effet inhibiteur de la fermentation alcoolique par l'éthanol,
- Identifier les cibles moléculaires impliquées dans l'adaptation de la levure à de fortes teneurs en éthanol.

Outre l'équipe du coordonnateur, les équipes impliquées sont Dequin, Microbiologie et Technologie des Fermentations, ENSAM-INRA-UMI, Montpellier; Boy-Marcotte, Institut Génétique et Microbiologique de Orsay, UMR CNRS 826; Aigle et Rigoulet, IBCG –CNRS Bordeaux.

Volet 3 : «Mise en œuvre de levures par des procédés performants pour la production d'éthanol bio-carburant et bio-procédés propres de mise en œuvre.» Coordinateur du projet : C. Jouve, UMR 5504 Laboratoire de Biotechnologie Bioprocédés Toulouse

Disposant de forts acquis méthodologiques et technologiques dans la fermentation alcoolique, cette équipe travaille sur l'intensification de la production d'éthanol bio-carburant par la levure *Saccharomyces cerevisiae*. Le projet concerne l'analyse des goulets d'étranglement relatifs à la production industrielle de bio-éthanol et la levée de certains de ces goulets. Pour rendre la production d'éthanol par voie microbienne économiquement viable, l'objectif est d'accroître la productivité de la levure et d'atteindre des titres en éthanol supérieurs à ceux obtenus dans les procédés industriels. Les levures dans ces conditions extrémophiles, de hautes concentrations en biomasse et en produit, présentent alors des modifications physiologiques et métaboliques (telles que la perte de viabilité, le découplage croissance/production, des modifications de composition membranaire...); interviennent également alors des changements importants de l'environnement des levures. L'ensemble de ces phénomènes biologiques et/ou physico-chimiques constituent les verrous qui limitent actuellement les performances de la levure. L'objectif est de déduire les étapes limitantes d'un point de vue procédé et microbiologique et d'optimiser les performances d'un bioréacteur et de prouver sa pertinence.

Volet 4 : «Extraction du bioéthanol» Coordinateur du projet : C. Jouve, UMR 5504 Laboratoire de Biotechnologie Bioprocédés Toulouse

Les équipes impliquées travaillent sur la séparation sélective de l'éthanol par des procédés non conventionnels et en analysent la pertinence énergétique. L'investigation a d'abord porté sur les procédés membranaires utilisant des membranes sélectives à l'éthanol, permettant soit un transport sélectif de ce constituant, soit sa rétention sélective en amont de la membrane. Outre l'objectif d'économie énergétique, cette démarche permet le recyclage des effluents et la diminution des coûts de dépollution. L'objectif, à terme, est l'élaboration d'un procédé de fermentation extractive hybride pertinent.

Coordonné par le Laboratoire de Biotechnologie et Bioprocédés, deux autres laboratoires sont concernés par cette étude : Charbit, Laboratoire de Génie des Procédés et Physico-chimie et Innocent, Institut Européen des Membranes.



Ce projet porte sur deux classes de matériaux novatrices aptes à former des cellules photovoltaïques en couches minces, à coût spécifique réduit, pour un développement industriel à grande échelle : d'une part des composés polycristallins du type CIS (CuInSe_2), d'autre part, des molécules et polymères organiques.

1 - Cellules à base des composés polycristallins Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS)

Ce sont actuellement les dispositifs en couches minces les plus performants mais la structure en est complexe, avec la présence de plusieurs interfaces : $\text{ZnO} / \text{CdS} / \text{CIGS}$. Le développement de cette filière requiert une parfaite maîtrise de ces interfaces, incluant *in fine* l'élimination de la couche tampon de CdS ou son remplacement par un composé ne contenant pas d'élément lourd. À cet effet une recherche de base a été engagée, fondée sur les analyses chimiques par spectroscopie XPS à haute résolution (1). Les principaux aspects abordés concernent les profils de composition interfaciaux, la détermination de la composition chimique de surface et l'influence des différents traitements chimiques utilisables pour la fabrication des structures.

Des informations complémentaires sont apportées par une collaboration hors PRI : mesures du potentiel de surface par sonde Kelvin et de la phototension des hétérojonctions (2) ; spectroscopie des états électroniques associés aux interfaces par mesures d'admittance (3).

L'objectif final de ces recherches est d'établir les corrélations les plus étroites possibles entre les propriétés (photo)électriques de ces structures et les données chimiques relatives aux interfaces afin d'obtenir, de manière reproductible, des rendements de conversion autour de 15 %.

(1) IREM, Versailles : A. Etcheberry, B. Canava

(2) LECA, Paris : J.F. Guillemoles, D. Lincot

(3) LGEP, Gif sur Yvette : D. Mencaraglia, Z. Djebbour

2 - Cellules en composés organiques

Ces dispositifs, encore au stade des études exploratoires, combinent plusieurs phases organiques assurant les fonctions d'absorption optique, de séparation et transport de charges électriques de signes opposés. Trois voies de travail sont engagées portant sur différents matériaux.

Les dérivés fonctionnalisés du fullerène C_{60} associent dans un même système moléculaire un donneur d'électrons photo-excitabile, tel que l'oligophénylène-éthynylène (OPE), et l'accepteur C_{60} (4). L'optimisation est recherchée en préparant de nouveaux matériaux dont la partie OPE ait à la fois une absorption plus importante dans le visible et un meilleur caractère donneur. Par ailleurs une étude est consacrée à la préparation de films minces ordonnés par la technique de Langmuir-Blodgett (LB). Elle utilise des dérivés amphiphiles du C_{60} , capables de former des monocouches uniformes et stables à l'interface air/eau et des dérivés OPV amphiphiles.

Une autre voie consiste à associer C_{60} à des polymères donneurs d'électrons dans des réseaux interpénétrés afin d'augmenter, pour une même surface apparente, la probabilité de photoexcitation à l'interface entre les deux phases (5). Le polymère type est le poly-phenylene vinylene (PPV) mais d'autres produits sont à rechercher. Les propriétés de transport de ces corps organiques sont étudiées par méthode de temps de vol et dans des dispositifs à effet de champ. Les caractéristiques de cellules bi-couches et à réseaux interpénétrés sont comparées.

La troisième voie porte sur l'utilisation de cristaux liquides colonnaires (6), produits par synthèse organique (7 hors PRI) Cette disposition en colonnes devrait assurer de bonnes propriétés de transport dans le sens vertical. Les deux phases nécessaires sont, par exemple, des dérivés de triphénylène comme transporteur de trous et des dérivés de pérylène pour le transport des électrons. Les propriétés de transport électrique sont déterminées par technique de temps de vol et des dispositifs photovoltaïques sont réalisés et analysés avec la configuration colonnaire souhaitée.

(4) IPCMS, Strasbourg : J.F. Nierengarten, D. Guillon

(5) ERT-POMA, Angers : J.M. Nunzi

(6) LGET, Toulouse : P. Destruel, I. Seguy

(7) CRPP, Pessac : H. Bock



Coordonnateur : Claude LAMY, Équipe "Electrocatalyse", LACCO, UMR 6503, Poitiers

Laboratoires participants :

Alain PERRARD, Institut de Recherches sur la Catalyse, IRC, UPR 5401, Lyon-Villeurbanne

Pascal BRAULT, Recherches sur l'Énergétique des Milieux Ionisés, GREMI, UMR 6606, Orléans

Gérald POURCELLY, Jean DURAND, Institut Européen des Membranes, UMR 5635, Montpellier

François LAPICQUE, Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, LSGC, UPR 6811, Nancy

Sophie DIDIERJEAN, Energétique et Mécanique Théorique Appliquée, LEMTA, UMR7563 Nancy

Serguei MARTEMIANOV, Laboratoire d'Études Thermiques, LET, UMR6608, ESIP, Poitiers

Les recherches effectuées dans le PRI "Co-PACEM" visent à améliorer le fonctionnement du cœur d'une pile à électrolyte membrane (PEMFC) fonctionnant à basses températures, afin de minimiser les surtensions des réactions électrochimiques impliquées (oxydation de l'hydrogène contenant des traces de CO, oxydation d'un alcool tel que le méthanol ou l'éthanol, réduction de l'oxygène), de diminuer la résistance et le coût de la membrane tout en améliorant ses propriétés (conductivité, stabilités mécanique et thermique, faible perméabilité à un alcool), et d'optimiser le transport des réactifs et de la chaleur au niveau des assemblages membrane-électrodes (AME). Les efforts de recherches ont été mené dans 3 directions :

** l'amélioration des propriétés (activité et sélectivité) des catalyseurs des réactions électrochimiques aux électrodes.*

De nouveaux supports carbonés obtenus par pyrolyse à 1200°C de la rayonne ont permis à l'IRC de préparer des catalyseurs de Pt très dispersé (surface spécifique de 600 m²/g et taille ≈ 2-3 nm).

La préparation de catalyseurs bimétalliques par la voie colloïdale (LACCO) conduit à des systèmes particulièrement actifs pour l'oxydation d'alcools (Pt-Ru pour le méthanol et Pt-Sn pour l'éthanol) et pour la réduction de l'oxygène en présence de méthanol (Pt-Cr et Pt-Ni). Par ailleurs la pulvérisation par voie plasma (GREMI) permet d'obtenir des catalyseurs de Pt fortement dispersé sur charbon (ce qui réduit la masse de Platine) d'activité tout à fait comparable aux catalyseurs de référence.

Les catalyseurs préparés par le GREMI et le LACCO ont été caractérisés au LMCCCO de Montpellier (Robert DURAND) par adsorption d'azote (mesure de la surface spécifique), par thermoréduction de l'hydrogène et par adsorption de CO (DRIFT, thermogravimétrie et microcalorimétrie).

** la synthèse et la caractérisation de nouvelles membranes protoniques ayant de meilleures performances que la membrane Nafion®.*

Des membranes de très faible épaisseur (1 à 10 μm), préparées par CVD-plasma (IEM) à partir de styrène et d'acide trifluoré, ont des résistances spécifiques de l'ordre de 1,5 Ω.cm² (5 à 10 fois supérieures à celle du Nafion), mais une perméabilité au méthanol 10 à 20 fois plus faible que le Nafion. Ces résultats permettent d'envisager ces membranes dans une pile à méthanol miniature.

Le LMOPS à Lyon (Régis MERCIER) a réalisé la synthèse de polyétheréthercétones (PEEK) hyperbranchés présentant des fonctions terminales acide sulfonique et PEEKs linéaires sulfonés, afin de concevoir des membranes protoniques alternatives au Nafion. De même le Laboratoire de Chimie Moléculaire de l'ENSC Montpellier (Bruno AMEDURI) a réalisé la synthèse de polymères fluorés aromatiques fonctionnalisés avec des capacités d'échanges ioniques (CEI = 0,9 méq/g) similaires au Nafion.

** la compréhension des phénomènes de transfert et de transport, et la gestion des fluides (notamment de l'eau) au sein des cœurs de pile.*

L'effet des conditions d'humidification des gaz (H₂ et O₂) sur les caractéristiques électriques d'une PEMFC de 25 cm² de surface active ont été déterminées (LSGC et LEMTA) par des mesures d'impédance électrochimique et des bilans en eau. L'importance d'une bonne gestion de l'eau (hydrogène fortement humidifié et pas d'excès d'eau à la cathode) a été confirmée.

Les transferts thermiques au sein du cœur de pile ont été modélisés et la conductivité thermique de diffuseur poreux a été évaluée (LEMTA). Les résultats de la modélisation montrent l'importance du débit des gaz et du fluide de refroidissement (eau) sur la distribution de température au sein du cœur de pile (écart de 3°C dans la membrane avec de l'hydrogène sec injecté à 25°C pour une pile travaillant à 80°C).

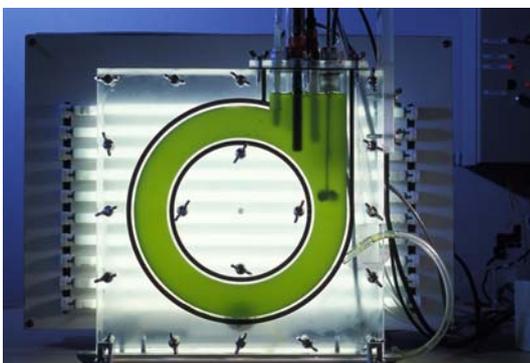
L'influence des paramètres de fonctionnement (température, pressions des gaz, leur humidité, leur débits) d'une pile PEMFC de 25 cm² a été étudiée à l'aide d'un nouveau banc de mesures (Fuel Cell Technologies) mis en place au LET en collaboration avec le LACCO.

Équipes concernées

- Laboratoire de Génie des Procédés - Environnement - Agroalimentaire de l'Université de Nantes (UMR-CNRS 6144)
- Laboratoire d'Ecophysiologie de la Photosynthèse du CEA de Cadarache (UMR CNRS-CEA 163)
- Laboratoire de Chimie, électrochimie moléculaires et chimie analytique de la Faculté des Sciences et des Techniques de Brest (UMR - 6521)
- Laboratoire de Chimie Inorganique, Institut de Chimie Moléculaire et Matériaux de l'Université Paris Sud d'Orsay (UMR - 8613)

La diminution des réserves d'énergie fossile et la perspective de changements climatiques causés par l'accroissement des concentrations atmosphériques en gaz carbonique rendent prioritaire la recherche de sources d'énergie renouvelables et de nouveaux vecteurs énergétiques. Si l'hydrogène moléculaire est souvent considéré, en raison de son contenu énergétique élevé et de sa combustion propre, comme un vecteur énergétique de choix, il reste à proposer des voies de production ne générant pas de gaz à effet de serre. Parmi ces voies, la photobioproduction d'hydrogène paraît prometteuse. Certains microorganismes photosynthétiques, comme les algues vertes unicellulaires ou les cyanobactéries, possèdent l'avantage de produire de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire en utilisant l'eau comme donneur d'électrons et de protons sans le dégagement parallèle de gaz à effet de serre (CO_2) inhérent aux autres organismes hétérotrophes (bactéries). Les électrons mobilisés par la photooxydation de l'eau sont utilisés par une enzyme particulière couplée à l'appareil photosynthétique appelée hydrogénase, pour réduire les protons et produire de l'hydrogène moléculaire. Cette propriété permet d'envisager le développement de procédés propres de photobioproduction d'hydrogène en utilisant les deux plus importantes ressources de notre planète, l'eau et l'énergie solaire. Le problème majeur expliquant le faible développement industriel de ce type de production vient de la nature transitoire du phénomène en conditions naturelles. L'arrêt rapide du processus de dégagement de l'hydrogène est lié au fait que l'hydrogénase, l'enzyme responsable de la production d'hydrogène, est fortement sensible à l'oxygène dégagé en parallèle par la photosynthèse lors de la biophotolyse de l'eau. Deux approches, non exclusives, sont abordées dans ce PRI.

- **Production d'hydrogène par des microalgues** : il s'agit d'élaborer à terme un procédé de bioproduction d'hydrogène mettant en œuvre les capacités photosynthétiques des microalgues (photobioréacteur). La mise en culture en milieu clos permet un contrôle poussé des paramètres (anoxie). Les expérimentations au niveau compréhension et amélioration des phénomènes métaboliques entrant en jeu dans la production de biohydrogène sont menées en parallèle de leur transposition au niveau du procédé de production et de son développement.
- **Développement de systèmes biomimétiques artificiels** : il s'agit de reconstituer des systèmes artificiels ou synthétiques plus ou moins complexes mimant les systèmes biologiques naturels, telle l'hydrogénase, pour développer de nouveaux catalyseurs biomimétiques utilisables par exemple dans des piles à combustible. De tels systèmes sont conçus soit pour produire de l'hydrogène, soit pour le consommer.



Photobioréacteur torique pour l'étude de la production d'hydrogène chez *Chlamydomonas reinhardtii*
(Crédit photo. Pascal Goetgheluck)

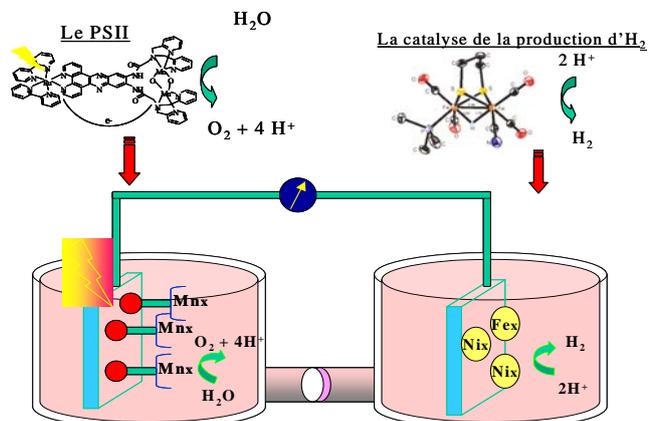


Schéma de principe d'un système biomimétique de production d'hydrogène



Coordinateur / Adsorption : A. Gicquel¹

Participants :

F. Darkrim Lamari¹, S. Kayran¹, A. Gicquel¹, J.M. Lirhman¹, P. Gadelle⁶, D. Levesque², P. Bernier³, CRMD⁴ et J. Bai⁵

Objectifs

Les applications de l'hydrogène dans le domaine de l'énergie sont nombreuses et sont d'un intérêt évident pour répondre à la demande de la société en terme de développement durable. Cela nécessite cependant que plusieurs verrous technologiques soient dépassés : le stockage est l'un d'entre eux. Il doit permettre entre autre des facilités d'usage en terme de capacités de stockage et de dynamique de stockage pour permettre aux piles à combustibles de fonctionner dans des conditions acceptables. Le PRI 4.2 propose d'accroître les connaissances permettant ainsi de lever certains des verrous évoqués. En particulier, on s'intéressera à possibilité d'utiliser des matériaux poreux optimisés pour le stockage par adsorption et des hydrures pour le stockage par chimisorption. Pour cela, le PRI associe plusieurs laboratoires au LIMHP (adsorption) et au LCMTR (chimisorption).

Mise en Œuvre et Résultats / Partie Adsorption

Pour tenter de résoudre une partie du problème du stockage par adsorption, nous nous sommes attachés à mettre au point des systèmes à base de nouveaux matériaux à haute capacité de stockage: les carbones nanostructurés. La principale difficulté réside donc dans l'obtention de ces matériaux. Cette obtention passe par la synthèse et la caractérisation de nouveaux matériaux, la maîtrise de leur production, la purification, la mise en forme de ces matériaux et une compréhension des phénomènes d'interaction gaz/matériaux. Dans l'état actuel d'avancement, les mesures de capacités de stockage faites au LIMHP ont porté sur des matériaux fournis par P. Gadelle, P. Bernier et J. M. Lirhmann. Les autres Laboratoires n'ont, à l'heure actuelle, pas pu fournir de matériaux à tester en adsorption sous pression. Le travail sur la synthèse en fonction des paramètres contrôlant la géométrie des matériaux est en cours au CRMD et MSSMAT.

Au LIMHP en collaboration avec le LPT, outre les mesures de capacité d'adsorption, nous avons poursuivi un travail théorique de simulation. Nous nous sommes intéressés à des systèmes nanoporeux idéaux. Ainsi, nous avons montré la possibilité d'optimiser le confinement stérique par l'étude du dimensionnement des nano-espaces poreux permettant ainsi l'augmentation de la capacité de stockage d'un faisceau de nanotubes de carbone constitués de 16 tubes parallèles placés dans une structure hexagonale 3D. La capacité de stockage est de 2wt% à température ambiante ($\Delta=0.8\text{nm}$) et 10MPa. Nous avons également démontré la possibilité qu'ont les nanotubes de carbone ouverts d'adsorber jusqu'à 2 fois plus de gaz que des nanotubes couramment utilisés (fagots de tubes fermés).

¹LIMHP UPR1311 (Villetaneuse), ²LPT UMR (Orsay), ³GDPG - UMR5581 (Montpellier), ⁴CRMD (Orléans), ⁵MSSMAT-UMR 8579 (École Centrale), ⁶ (LTPCM- INPG).



Insertion de la production décentralisée dans un réseau d'énergie électrique

Résumé :

Les réseaux électriques sont en phase de mutation profonde. En effet, l'ouverture à la concurrence des marchés de l'énergie électrique, les préoccupations environnementales de nos sociétés modernes (difficulté de construction de nouvelles lignes, ratification du protocole de Kyoto), la saturation des grands réseaux de transport et l'évolution des technologies de petite génération et de stockage ainsi que des technologies de l'information et de communication constituent quelques-uns des facteurs les plus déterminants de cette mutation.

C'est dans ce contexte qu'on assiste à un développement de la production dite «décentralisée». La production décentralisée introduit des changements radicaux sur les métiers de la génération, du traitement et de la distribution de l'énergie électrique et remet en cause la planification, la conception, le fonctionnement et l'exploitation de ces réseaux. En effet, Ces réseaux n'ont pas été conçu dans cette optique (raccordement d'unités de production à «grande échelle») et la possibilité d'introduire ces sources d'énergie au sein de ces réseaux peut avoir des conséquences importantes sur la circulation des flux énergétiques et donc sur la philosophie et l'implémentation du système de gestion et de la protection du réseau.

L'insertion de cette production décentralisée au sein du système électrique existant n'est donc pas sans impact sur l'exploitation de ce dernier. Elle présente un véritable défi par les multiples incertitudes actuelles sur les capacités d'intégration de telles productions dans le système, avec tous les problèmes qui y seront engendrés, et les adaptations nécessaires à opérer sur le système actuel.

Le programme entrepris dans le cadre de PRI 5.1 (Étude des transferts d'énergie dans les réseaux) s'est particulièrement focalisé sur l'impact de la production décentralisée sur les réseaux de distribution, notamment en HTA. Les aspects étudiés concernent :

1. Impact sur les systèmes de protection
2. Impact sur les profils de tension
3. Impact sur les temps critiques d'élimination des défauts
4. Impact sur la stabilité

Les résultats obtenus ont montré que ces impacts peuvent être considérables mais dépendent de nombreux facteurs :

1. Structure du réseau
2. État de charge du réseau
3. Type de transformateur du poste source
4. Emplacement de la production décentralisée

Partenaires :

LEG
LEEP



Coordination : GDR ISP

1. Architectures de convertisseurs :

Laboratoire impliqué : LEEI

Les activités du groupe convertisseurs statiques du LEEI ont mis en avant ces dernières années de nouvelles structures de convertisseurs «multiniveaux». Dans le domaine de la forte puissance et de la haute tension, les onduleurs multiniveaux, basés sur l'association de cellules de commutation, permettent un fonctionnement avec une fréquence de découpage élevée grâce à l'utilisation de composants semiconducteurs ayant une tenue en tension inférieure à la tension du réseau considéré. Afin d'étendre les connaissances dans le domaine de la forte puissance ($1 \text{ MW} < P < 100 \text{ MW}$), le LEEI a développé, dans le cadre de ce programme de recherche, un banc d'essais permettant de faire fonctionner en régime permanent des cellules de commutation moyenne tension et fort courant (1.5 kV / 2000 A).

2. Conception d'interrupteurs en silicium haute tension (5 à 6 kV)

Laboratoires impliqués : LEG, LAAS

Une analyse des différents composants haute tension IGCT, IEGT, IGBT et des terminaisons de jonction haute tension, doit permettre de trouver le meilleur candidat pour des topologies de mise en série. En effet, même si les interrupteurs élémentaires progressent en terme de calibre en tension, il reste nécessaire de les associer pour pouvoir atteindre des niveaux plus élevés (plusieurs dizaines de kV). La mise en série de composant de type IGBT impose des stratégies de commande et de protection au plus près de ces composants, afin d'assurer non seulement leur protection, mais également l'équilibrage des tensions, de manière notamment à assurer des durées de vie comparables. Une large gamme de solutions a été investiguées, basée sur une connaissance du comportement des IGBTs vis à vis des circuits de commande. Parallèlement à cette étude de la mise en série, la montée en tension impose l'analyse des problèmes de packaging: que ce soit pour encapsuler un composant haute tension, ou des associations série de quelques IGBTs au sein d'un même boîtier, il est nécessaire de prendre en compte les problèmes de contrainte en champ électrique en plus des classiques besoins en terme de thermique et d'inductance parasite.

3. Prospective long terme : composants commandables forte tension en SiC ou diamant

Laboratoires impliqués : CEGELY, LGET, LEEI, LAAS

Une solution alternative à la mise en série de composants de puissance silicium pour la réalisation de convertisseurs haute tension (supérieure à 6 kV), pourrait être l'utilisation de semi-conducteurs tels que le carbure de silicium (SiC) ou le diamant (C) compte tenu des champs de rupture et des conductivités thermiques élevés de ces deux matériaux.

a) Conception d'interrupteurs forte tension en SiC – Première étape : 6 kV

Les travaux ont porté sur la définition de la cellule active du composant et de sa protection périphérique, avec prise en compte de l'environnement diélectrique du semi-conducteur. Le CEGELY a fabriqué des diodes bipolaires planar en utilisant les moyens du CIME, et en collaboration avec l'IMM (Bologne). La caractérisation électrique de ces composants non passivés montre des résultats encourageants: 4,8 kV de tenue en tension, et une densité de courant de 100 A/cm^2 sous 5 V. Divers types de matériaux inorganiques et polymères ont été retenus pour passiver ces structures et des mesures expérimentales de leurs propriétés diélectriques en fonction de la température sont en cours au LGET. Concernant l'aspect interrupteur commandable, le CEGELY a conçu et caractérisé des thyristors gravés fabriqués par l'Institut Saint-Louis (ISL) en collaboration avec l'Université d'Aix la Chapelle. Les caractérisations électriques montrent une tenue en tension allant jusqu'à 4 kV et une densité de courant de 350 A.cm^{-2} sous 13 V. De même, un transistor unipolaire de type JFET a été réalisé au LETI.

b) Potentialités du diamant pour l'obtention d'interrupteurs de puissance haute tension

La possibilité de réaliser des interrupteurs 25 kV voir même 40 kV ouvrent des perspectives nouvelles dans le traitement de l'énergie sur les réseaux de distribution. Nous étudions des alternatives aux composants classiques où l'injection de porteurs serait assurée par un faisceau énergétique optique (UV) ou canon à électrons. Dans le cadre des PCCS (Photo Conductive Controlled Switch) le diamant présente le meilleur facteur de mérite. Les caractérisations des propriétés thermoélectroniques ont contribué à l'optimisation des paramètres de croissance pour l'application visée, dans le cadre d'une collaboration avec le LIMHP. Une attention particulière a été portée à la mise en place de bancs de caractérisation spécifiques, en collaboration avec le LGET pour les aspects diélectriques et le LAAS et LPL pour les propriétés optoélectroniques. Le dopage par implantation de Bore est aujourd'hui maîtrisé à l'aide des outils du LAAS et permet la réalisation des contacts ohmiques nécessaires à nos caractérisations.



Froid solaire : procédé thermochimique de production de froid à -30°C à partir de capteur solaire basse température (70°C)

Unités impliquées :

- CNRS UPR8521 – Institut de Science et de Génie des Matériaux et Procédés (IMP) – Perpignan - (Driss STITOU)
- CNRS UMR6608 – LET-ENSMA – Poitiers - (François PENOT / Denis LEMONNIER)
- EA 810 – Laboratoire d'énergétique (ex LESETH) – Université de Toulouse – (Françoise MONCHOUX)

A l'échelle mondiale, la production de froid dans l'habitat (individuel ou collectif) apparaît comme un enjeu énergétique majeur de ce nouveau siècle. L'essor économique des pays en voie de développement, soumis dans leur majorité à des climats chauds, va entraîner une demande croissante des besoins en froid pour la conservation des denrées alimentaires, des vaccins, ou pour la climatisation par exemple. L'enjeu est également de réduire la consommation en énergie primaire et de limiter les pics de puissance en électricité. Or actuellement, les solutions de production de froid reposent essentiellement sur des systèmes frigorifiques à compression, grands consommateurs en énergie électrique. Il s'agit donc de concevoir des technologies innovantes capables de répondre à ces besoins en froid sans augmenter la consommation d'énergies fossiles afin, notamment, de contrôler les émissions de gaz à effet de serre et de réduire l'impact environnemental des fluides frigorigènes (utilisation de fluide neutre vis-à-vis de la couche d'ozone).

Dans ce contexte, ce projet de PRI vise donc à étudier la faisabilité, à concevoir et expérimenter un procédé de production et de maintien du froid à des températures inférieures à -22°C, température minimale requise pour la conservation alimentaire de longue durée, et requérant un bas niveau de température pour la source chaude du procédé (inférieure à 70°C) pour des applications de congélation/conservation de denrées dans le domaine de l'habitat (chambre froide intégrée). Les études préliminaires menées à l'Institut de Matériaux et Procédés, ont permis la définition d'un nouveau concept de procédé basé sur l'utilisation d'une réaction chimique renversable entre un solide réactif et un gaz couplée à un changement d'état liquide/gaz. Ce procédé permet de produire du froid à -22°C (avec un évaporateur à -30°C) tout en utilisant de la chaleur à basse température issue, dans le cadre de cette étude, de capteurs solaires plans fonctionnant classiquement à 60/70°C.

Le procédé de congélation solaire proposé est un procédé thermochimique par nature cyclique, alternant une phase nocturne de production de froid suivie d'une phase diurne de régénération grâce à l'énergie solaire. La phase de régénération ayant lieu le jour, l'énergie solaire permet la décomposition du sel contenu dans le réacteur intégré au capteur solaire. Le gaz desorbé est condensé et la chaleur de condensation est rejetée dans un puits de chaleur tel que le milieu ambiant. La phase de production de froid ayant lieu la nuit, l'énergie pompée à la chambre froide permet l'évaporation du fluide de travail. Le gaz produit est absorbé par le sel, dégageant de la chaleur qui est évacuée dans un puits de chaleur disponible.

L'enjeu n'est pas seulement de développer un procédé innovant de congélation solaire mais aussi de proposer un système capable de répondre aux exigences socio-économiques, notamment en terme de faible coût global (capteur, équipement, maintenance) et de simplicité technologique (système sans vanne et autoadaptatif aux conditions extérieures). Par ailleurs du fait de la faible température de la source chaude requise, le système proposé peut tout à fait s'intégrer dans une installation de chauffage solaire ou de production d'eau chaude sanitaire solaire existante sans modifications majeures (critère d'intégrabilité). Il peut tout aussi bien utiliser des rejets thermiques (utilisation de la chaleur des fumées en sortie de chaudière) ou encore le potentiel thermique de sources d'eau chaudes géothermales.

Synthèse des travaux réalisés et résultats préliminaires

Les résultats atteints au cours de cette première année d'étude ont permis de caractériser les matériaux réactifs répondant le mieux aux exigences de ce procédé, en terme de niveaux opératoires de température et de pression, de performance et de densité énergétique et d'encombrement. Une première évaluation du procédé a permis de montrer que les contraintes les plus fortes se situaient au niveau du refroidissement du réacteur pendant la phase nocturne de production de froid. En effet, l'objectif initial du projet était de concevoir des capteurs solaires, performant le jour, et intégrant une fonction de radiateur (par rayonnement vers le ciel) pour dissiper la chaleur du réacteur durant la phase nocturne. Cette double fonctionnalité antagoniste ne semble pas pouvoir être remplie pour des questions raisonnables d'encombrement. Aussi, le projet a donc évolué au cours de cette première étude vers des solutions permettant de lever ce verrou, notamment en intégrant un second procédé en cascade permettant un refroidissement actif du réacteur vers 5°C assurant à son tour la production de froid à -30°C. Les deux procédés sont identiques mais ont des conditions opératoires différentes pendant la phase nocturne.

Une modélisation de ce procédé thermochimique à production de froid en cascade a donc été développée pour estimer dans des conditions météorologiques réelles les performances et le comportement du procédé ainsi que pour établir un dimensionnement optimal d'un prototype pour une chambre froide à -23°C avec une puissance moyenne journalière de 50W qui permettra de démontrer la faisabilité de ce concept. Les expérimentations doivent avoir lieu au cours de la prochaine période d'été 2004.



Contact : Christophe Ménézo / Centre de Thermique de Lyon / christophe.menezo@insa-lyon.fr

Ce projet intègre 7 laboratoires : le CETHIL UMR 5008 laboratoire inter-établissements UCB Lyon1/INSA de Lyon, le CENERG de l'École des Mines de Paris, le LEEVAM-LEEE EA 387 de l'Université de Cergy, le LOCIE de l'Université de Savoie, le SPE UMR 6134 de l'Université de Corse. Deux nouveaux partenaires ont été intégrés cette année : le GENEC du CEA de Cadarache et le IDHE UMR 8533 de l'École Normale Supérieure de Cachan.

En France, l'habitat représente 45% de la dépense énergétique globale du pays (devant le secteur des transports) et le quart du dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère. D'autre part, la consommation d'énergies fossiles, dont les réserves mondiales sont limitées, générant des gaz à effet de serre doit être réduite. Pour ces raisons et au regard de nos engagements internationaux, il s'avère indispensable que le bâtiment ne soit plus un simple consommateur d'énergie mais devienne un producteur participant ainsi à son autonomie. La production localisée limite ainsi les pertes lors du transport de l'énergie produite sur des lieux éloignés de la consommation. L'électricité et la chaleur sont deux énergies complémentaires et indispensables pour le bâtiment. L'énergie électrique fournie par une installation photovoltaïque ne représente qu'une très faible proportion du rayonnement solaire disponible, le reste se dégrade en chaleur et se perd dans le milieu ambiant. Une installation solaire thermique ne peut se passer d'électricité nécessaire à la circulation du fluide caloporteur et à ses organes de régulation. Ce projet de recherche se propose d'optimiser des solutions intégrées à l'enveloppe du bâtiment et fournissant simultanément les deux formes d'énergie.

Deux voies d'intégration de composants solaires *hybrides* (PV-T) sont explorées dans ce projet: intégration en double-peau photovoltaïque (PV-T air : production d'électricité et préchauffage de l'air des locaux) et en capteur solaire à eau (PV-T eau : production d'électricité, chauffage et ECS). Les objectifs scientifiques peuvent être regroupés en trois grandes actions.

La première (*étude des mécanismes physiques*¹) consiste à identifier et approfondir les connaissances sur les facteurs limitant le rendement des composants photovoltaïques/thermiques afin de réaliser des modèles prédictifs *fin*s. Ces modèles permettront ainsi de suivre les évolutions futures des produits intégrés au bâti. Les modèles thermiques développés à cette échelle ont été validés et sont couplés (mécanique des fluides et conduction et rayonnement en Milieux Semi-transparents). L'aspect conversion électrique reste à intégrer.

La deuxième action (*gestion thermique/électrique*²) consiste à développer des modèles simplifiés des composants pouvant être intégrés dans des codes de calcul de comportement thermo-aérodynamique global des bâtiments. Cette action permet, à ce stade, d'optimiser les productions d'électricité et de chaleur en fonction des besoins. Elle intègre, par conséquent, l'aspect stockage et utilisation de cette énergie à travers la modélisation du comportement thermique de l'ensemble d'une unité d'habitation en couplant la globalité du système récupérateur d'énergie (électrique et thermique) avec le comportement thermique de l'enveloppe et des systèmes de chauffage de base.

La modélisation des transferts thermiques et de la conversion électrique à ces échelles fondamentale¹ et intermédiaire² est en passe d'être opérationnelle et le transfert des connaissances entre ces échelles doit débiter. La conception et l'identification de plate-formes expérimentales alimentant ces actions (détermination des propriétés optiques des matériaux, rendements de pilotes in-situ,...) est en cours et devrait permettre de fournir des données dès cette année.

L'ensemble de ces recherches *physiques* est orienté par une troisième action portant sur *l'analyse des aspects socio-économiques*³ liés à l'intégration des énergies renouvelables dans l'habitat qui concernent d'une part la question des transferts de technologie des laboratoires vers l'industrie et, d'autre part, la mesure de l'acceptabilité sociale de ces nouvelles formes énergétiques et son orientation par l'adoption de mesures de politique économique appropriées.

Ce projet a pu bénéficier du soutien complémentaire d'industriels ou d'organismes tels que CLIPSOL, ADEME, CSTB et d'autres avec lesquels une collaboration n'a, pour l'instant, pas pu se concrétiser tels que Total Énergie, BP Solar, Photowatt.



Le projet HYSOL vise à examiner et développer un ensemble de procédés thermique de synthèse d'hydrogène par voie solaire pour lesquels les travaux théoriques et expérimentaux à l'échelle laboratoire et à l'échelle semi-pilote devront s'échelonner du court terme au long terme. Cette approche permet d'étudier les problèmes scientifiques de base et d'identifier les verrous technologiques au développement de procédés solaires à échelles pilotes ou industrielles.

Trois voies de production sont examinées :

- *Craquage d'hydrocarbures*
- *Reformage non catalytique à haute température*
- *Décomposition de l'eau par cycles thermochimiques*

Les deux premiers procédés solaires sont basés sur des voies de synthèse classiques (à partir d'hydrocarbures). Même s'ils ne permettent pas de s'affranchir des ressources d'hydrocarbures (fossiles ou biomasse), ils permettent le stockage et le transport de l'énergie solaire et évitent le rejet de gaz à effet de serre (pour le craquage). La troisième voie, les cycles thermochimiques de décomposition de l'eau, s'inscrit dans une démarche scientifique à plus long terme.

Ainsi, les objectifs visés sont :

- Démontrer la faisabilité de la production d'hydrogène par voie solaire par différentes méthodes.
- Développer les bases scientifiques et technologiques permettant de produire, à terme, de l'hydrogène par voie solaire (thermique) de façon économique.
- Étudier les différents éléments spécifiques de la filière hydrogène par voie solaire : systèmes de concentration du rayonnement, ensemble : récepteur /réacteur/ séparateur, modes de valorisation...

Au plan expérimental, les efforts ont été portés uniquement sur le craquage du méthane. Les aspects suivants sont étudiés : propriétés radiatives du méthane à haute température (EM2C, École Centrale de Paris), décomposition et cinétique de réaction mesurées à l'aide d'un simulateur solaire (LSGC-ENSIC, Nancy), craquage du méthane dans un réacteur solaire (IMP-CNRS, Odeillo). Des résultats expérimentaux ont été obtenus dans ces trois domaines.

Au plan de la simulation numérique, le LGPSD-EMAC et N'Ghy ont développé, en collaboration avec l'IMP, un modèle de simulation du reformage non catalytique du propane dans un réacteur solaire poreux. Cette simulation est basée sur la mise en oeuvre d'un code de calcul décrivant de façon détaillée la cinétique des réactions couplé à un modèle de transferts et réaction en lit fixe.

Enfin, deux bases de données concernant les cycles thermochimiques ont été construites (IMP). L'une, référençant l'ensemble des articles sur ce thème, est basée sur l'exploitation de mots clés à partir de bases classiques ou des travaux de «General Atomic» aux USA ; l'autre, dédiée à la définition précise des différents cycles, est encore en cours de construction.

Participants :

IMP-CNRS (UPR 8521) ; LSGC (UPR 6811), J. Lédé ; EM2C (UPR 288), M-Y Perrin ; LGPSD (UMR 2392), S Salvador ; TIMCAL Belgique, F. Fabry et N-GHY, Ph Marty.

Coordinateur :

Gilles Flamant (IMP-CNRS)



1. OBJECTIFS

La thermodynamique des systèmes et procédés connaît un foisonnement d'approches (analyses entropiques, exergétiques, thermodynamique en temps fini, thermodynamique des processus irréversibles,...). On cherche ici à **fusionner et rapprocher les diverses démarches**, pour proposer une **méthodologie cohérente de type universel**.

Les champs d'application sont principalement du point de vue fondamental les **sciences physiques**, du point de vue technique les **sciences de l'ingénieur** avec un **prolongement vers l'économie et l'environnement**, pluridisciplinarité nécessaire pour un développement durable.

Les objets privilégiés d'étude sont les **systèmes et les procédés énergétiques**, en vue :

- de la conception de nouveaux procédés
- du contrôle – commande – optimisation dynamique (nécessitant la connaissance et modélisation des phénomènes dynamiques et instationnaires).

2. RENCONTRES, École d'Été

- Une réunion de constitution du groupe a eu lieu le 16 Septembre 2002, et a permis de dresser un **état des lieux de la thermodynamique** en France, **en relation avec l'Énergétique et le Génie des Procédés** (P. NEVEU coordonnateur) et mise en place du site web : <http://www.imp.cnrs.fr/energie/pri81/>
- Cette réunion a été suivie d'un **séminaire de travail** du même groupe à **GOURETTE**, du 3 au 5 Février 2003 (F. STRUB, coordinatrice) : résumés des interventions sur site web.
- La troisième manifestation a été l'**École d'Été de THERMODYNAMIQUE** à ODEILLO, du 7 au 10 Juillet 2003, avec pour thème principal l'intégration de systèmes (A. LALLEMAND, coordinateur).

Animation du Forum Carnot (en cours)

4 cas d'école sont proposés aux membres du réseau :

- analyse des cycles endoréversibles ;
- optimisation d'un cycle combiné ;
- pédagogie de la thermodynamique : explorations virtuelles de modèles de cycles frigorifiques ;
- évaluation des performances énergétiques du moteur RU1.

3. PERSPECTIVES (coordonnateur : M. FEIDT)

- 2^{ème} école de thermodynamique (Avril 2004, Nancy) ;
- développement de l'animation du Forum (un animateur par cas d'école ; un porteur du site web) ;
- ouverture vers le monde scientifique français, européen, international et INDUSTRIEL ;
- préservation des tribunes du domaine (édition ENTROPIE).

4. PARTICIPANTS

10 équipes, pour 32 participants :

- CENERG, École des Mines, Paris (3 personnes ; R. GICQUEL, Pr.)
- CETHIL, UMR 5008, INSA, Lyon (1 personne ; A. LALLEMAND, Pr.)
- CNAM, Laboratoire des moteurs et turbomachines
EA 1408, Paris (3 personnes ; M. PLUVIOSE, Pr.)
- École des Mines, D. SEE, Nantes (3 personnes ; M. TAZEROUT, MA)
- IMP, UPR 8521, Perpignan (4 personnes ; B. SPINNER, Pr.)
- LAIL, UPRESA 8021, UST, Lille (4 personnes ; B. OULD BOUAMAMA, MCF)
- LATEP, Université, Pau (5 personnes ; F. STRUB, MCF)
- LEMTA, UMR 7563, Nancy (3 personnes ; M. FEIDT, Pr.)
- LIMSI, UPR 3251, Orsay (1 personne ; M. PONS, CR)
- LSGC, UPR 6811, Nancy (5 personnes ; D. TONDEUR, DR)

et un chercheur étranger de CANMET (Canada) : M. SORIN



Participants : CETHIL (Lyon), CRTBT (Grenoble), IUSTI (Marseille), LEGI (Grenoble), LEMTA (Nancy), LT (Nantes), CEA-GRETH (Grenoble) : 16 personnes (enseignants-chercheurs et chercheurs) représentant 7 équivalents temps plein.

Les objectifs de ce projet sont la compréhension des mécanismes de transferts de chaleur aux microéchelles, aussi bien pour les échanges monophasiques que diphasiques (ébullition) afin de déterminer des méthodes de conception de microéchangeurs performants. La voie envisagée est essentiellement une approche expérimentale avec des configurations géométriques simples pour mieux découpler les phénomènes. L'approche système n'est actuellement abordée que par le GRETH.

Convection en simple phase dans des microcanaux

LEGI – Les expériences ont été effectuées avec des canaux à section rectangulaire, à une dimension submillimétrique (e de 100 μm à 1 mm), à parois très lisses ou à rugosité contrôlée, et avec de l'eau déminéralisée. Les résultats ont montré que pour une paroi lisse, il n'y a aucune modification des lois de l'hydrodynamique. Pour une paroi rugueuse, les rugosités n'introduisent pas de transition anticipée à la turbulence, en revanche, une augmentation du nombre de Poiseuille de 20 à 30 % a été observée en régime laminaire pour des canaux de 196 μm et 96 μm respectivement. En régime développé, les lois macroscopiques de transfert de chaleur restent inchangées jusqu'à 500 μm et les échanges sont dégradés pour des canaux de plus faible épaisseur.

LEMTA – Pour des canaux rectangulaires ($50 \mu\text{m} < e < 1 \text{ mm}$), la transition à la turbulence diminue avec l'épaisseur du canal ($700 < Re < 1600$). Un coefficient de frottement inférieur à celui macroscopique a été obtenu. Une mesure locale de la chute de pression sera réalisée par sondes électrochimiques pour éliminer les effets d'entrée et confirmer les résultats. Une modélisation des transferts a montré que la conduction dans la paroi est un phénomène limitant, par conséquent, il existe une conductivité optimale. Un résultat capital est que l'estimation des coefficients d'échange en microcanaux doit passer par l'utilisation de modèles de conduction multidimensionnels ou des mesures locales.

CRTBT – L'originalité de cette étude tient à la dimension des canaux à section rectangulaire (e d'environ $7 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$, mesurée au MEB). Les microcanaux et ses capteurs associés, à savoir des jauges de contraintes en Cu-Ni déposées sur une membrane nitrurée de silicium, en contact avec le microcanal, sont usinés dans du silicium et scellés avec une plaque de Pyrex. Avec ces mesures locales de pression, le comportement avec de l'eau désionisée et en régime laminaire est inchangé par rapport aux macroéchelles.

IUSTI – L'étude a mis en évidence une augmentation du nombre de Poiseuille, qui peut atteindre 30 %, pour des écoulements de fluides ioniques (eau distillée, eau de ville, solution de KCl) au sein de microtubes de diamètres allant de 52 à 540 μm . Cet effet est attribué à la double couche électrique due aux ions contenus dans le fluide et aux charges surfaciques du tube en quartz (isolant électrique).

LT – Une première étude a été effectuée avec un canal rectangulaire ($e = 590 \mu\text{m}$) usiné dans de l'acier inoxydable. Des mesures globales n'ont montré aucun changement notable dans les transferts thermiques, ni dans les chutes de pression. Pour travailler avec des dimensions plus faibles (acier inoxydable), un second banc d'essais, dimensionné grâce à une simulation numérique des transferts thermiques conductifs dans les parois, est en cours de développement.

Changement de phase liquide-vapeur en microcanaux

CETHIL – Le travail porte sur l'étude des configurations d'écoulement et des transferts thermiques au cours de l'ébullition confinée en convection naturelle pour des canaux rectangulaires verticaux ($100 \mu\text{m} < e < 1 \text{ mm}$). L'étude expérimentale, réalisée avec du pentane montre une augmentation notable du coefficient d'échange avec la diminution de l'épaisseur du canal, accompagnée d'une réduction du flux critique. L'amélioration optimale correspond à un canal de 200 μm pour un régime de bulles isolées déformées.

IUSTI – L'étude pour un microcanal vertical a mis en évidence deux régimes d'ébullition : stationnaire avec des structures d'écoulement classiques et instationnaire, avec des instabilités de pression et de températures fortement couplées au système. Un critère de transition entre ces régimes a été proposé.

LEGI – Une étude a été effectuée avec des canaux approximativement carrés ($e = 590 \mu\text{m}$) usinés dans de l'aluminium. Au cours de l'ébullition convective, les régimes observés corroborent les observations de l'IUSTI avec des écoulements de retour.

Microéchangeurs

GRETH – Le GRETH a effectué une recherche des applications potentielles des microéchangeurs en monophasique et étudié différents concepts de microéchangeurs, réalisables industriellement. Il a réalisé un prototype de microéchangeur, à canaux parallèles en polycarbonate (qq cm) et développé, en collaboration avec le CRTBT, des sondes résistives par dépôt d'or en couche mince sur polymère, qui ne donnent pas de mesures reproductibles actuellement.


Sujet d'étude : Distribution de froid par fluide frigoporteur diphasique. Cas du coulis de glace stabilisé.

CETHIL-Lyon, LBHP-Paris, LaTEP-Pau, UR GPAN/CEMAGREF-Antony, GRETh/CEA-Grenoble. 8 personnes en équivalent temps plein (16 pers. physiques) affectées à ce projet : 4,6 chercheurs confirmés, 0,6 ingénieur ou technicien et 2,8 étudiants de 3^{ème} cycle.

Objectif de l'étude

Participer à la recherche et au développement de solutions alternatives à l'usage des fluides classiques pour le transport de froid. Les solutions étudiées utilisent les **fluides frigoporteurs diphasiques** (FFD) comme les coulis de glace (solution aqueuse d'alcool par exemple) ou des particules à changement de phase liquide–solide en suspension dans un fluide. Considérant l'intérêt potentiel de cette dernière catégorie de FFD, il est apparu important de **poursuivre les recherches** sur cette thématique des "**coulis stabilisés**", c'est-à-dire d'un **matériau à changement de phase (MCP) retenu à l'intérieur d'une matrice ultra poreuse mise en suspension dans un fluide**. On s'intéresse plus particulièrement aux propriétés de transport de ces FFD, à leur stabilité et au mode de détermination en ligne de leur état.

Répartition des tâches – État des recherches
CETHIL

- a) Analyse de l'intérêt de l'emploi des FFD pour la distribution du froid
Deux systèmes de climatisation d'un immeuble ont été modélisés : l'un avec un frigoporteur monophasique, l'autre avec un FFD. Les premiers résultats de simulation donnent un léger avantage au FFD. Le modèle doit être affiné et étendu à d'autres applications et au système à détente directe.
- b) Étude expérimentale et théorique du comportement thermique du coulis de glace stabilisé
 - Une boucle expérimentale a été conçue. Elle doit permettre d'avoir la connaissance des transferts thermiques en échangeur à plaques de ce type de fluide particulaire avec changement de phase. La boucle est construite ; les premiers essais de qualification sont en cours.
 - Modélisation (coll. GRETh) des écoulements et des transferts thermiques en régime turbulent.

GRETH

- a) Caractérisation géométrique du coulis et étude rhéologique notamment sous cyclage thermique
Un banc d'essais a été réalisé. Les premiers résultats ont mis en évidence une agglomération et une adhésion aux parois des particules nécessitant l'addition d'un tensio-actif. Avec ce nouveau produit, les premiers résultats à diverses températures sont encourageants, même si les pertes de charge apparaissent comme très sensibles à la charge en particules et à la température.
- b) Modélisation de l'écoulement et des transferts thermiques. A part une modélisation d'aide au dimensionnement de la veine d'essais du CETHIL, cette partie du travail n'a pas été abordée.

URGPAN

Le banc d'essais réalisé et les analyses correspondantes

- a) ont permis d'obtenir de précieux renseignements sur le comportement et la stabilité dans le temps de divers types de particules, suite à des cycles congélation-décongélation ;
- b) ont porté sur les mesures de concentration en glace par transmission IR. Si l'interprétation des résultats est délicate, compte tenu de la consistance du coulis, la méthode apparaît comme intéressante. Les études doivent être poursuivies, sur du coulis plus stable, le problème de la connaissance de l'état du coulis étant capital pour la gestion énergétique des FFD.

LBHP

- a) Caractérisation physique et fourniture du produit de base : broyat d'acrylamide (gel polymère microporeux chargé en MCP). Suite aux essais du GRETh, recherche et addition d'un tensio-actif.
- b) Développement d'un dispositif expérimental de production en continu de particules sphériques calibrées. Premiers essais avec des billes d'alginate : échec dû à un défaut de stabilité. Idem pour le développement d'autres produits à base de carghénanes. Le dispositif existe. Mais, les produits réalisés jusqu'à présent selon cette technique se sont révélés inaptes car instables (résultats des études). Abandon temporaire de la filière.

LaTEP

- a) Étude calorimétrique du changement de phases et analyse de la surfusion : réalisation de nombreux essais sur divers échantillons plus ou moins importants en taille.
- b) Analyses calorimétriques du comportement du produit : études de l'exsudation, de la conductivité du gel, pureté des produits (notamment influence de la présence de surfactant,...).

PRI 10.1

Capture par adsorption du CO₂ dans des gaz de centrales thermiques et leur injection en gisement de pétrole



Coordonnateur :

Daniel Tondeur

- Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris (*R.Gicquel*)
- Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, INPL-UHP Nancy (*R.Benelmir, R.Boussehain, M.Feidt*)
- Institut des Matériaux et Procédés, CNRS, Perpignan (*V.Goetz, X.Py*)
- Laboratoire de Thermodynamique des Milieux polyphasés, INPL Nancy (*J.N.Jaubert*)
- Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux (*D.Bernard*)
- Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, CNRS-INPL, Nancy (*D.Tondeur, J.P.Corriou, E.Favre*)

Objectif général du Projet :

Concevoir un procédé adapté de type Adsorption Modulée en Pression et l'intégrer (avec une conversion CO₂ => CO) dans le schéma d'une IGCC. Évaluer le coût énergétique de la capture. Évaluer des alternatives.

Pourquoi ces choix ?

Les centrales modernes à gazéification et à cycle combiné (IGCC) existent en vraie grandeur et semblent adaptées à la capture, car elles ont une logique de procédé propre et d'intégration énergétique. De plus, elles mettent en œuvre des gaz sous pression. Mais elle nécessite la conversion de CO en CO₂.

La technique d'adsorption est industrielle, et sait traiter des débits importants de gaz semblables à ceux considérés ici. Cependant, elle n'a pas été évaluée sur des bases satisfaisantes.

L'injection en puits de pétrole est déjà pratiquée pour faire de la récupération améliorée, en utilisant des technologies connues, mais sa faisabilité dépend fortement des conditions du gisement.

Plan de travail et résultats :

ADSORBANTS. Sélectionner des charbons actifs appropriés pour cette application, en développer de nouveaux et mettre au point des tests simples pour les évaluer. L'IMP Perpignan a pu augmenter de 25% la capacité opératoire volumique d'un charbon commercial, sur la base d'un test de "respiration" (différence entre adsorption à haute et basse pression). Une étape ultérieure est de développer des composites permettant de fonctionner en quasi-isothermicité. Parallèlement, le LSGC explore le potentiel d'absorbants granulaires d'un type nouveau, alliant carbone et polymères.

PROCEDE PSA. Définir, puis modéliser et optimiser un cycle de fonctionnement à plusieurs colonnes, avec le cahier des charges suivant : récupérer la quasi-totalité de l'Hydrogène-combustible sous pression (>15 bar); capturer une proportion importante du CO₂ généré (de l'ordre de 85%), sous une forme favorable à sa liquéfaction; intégrer énergétiquement le procédé dans le schéma de centrale. Le LSGC a développé un programme de simulation de divers cycles PSA. La recherche des conditions satisfaisant au mieux le cahier des charges est en cours. Il s'avère quasi impossible de réaliser un cycle n'important pas d'énergie autre que la chaleur et la pression du gaz à traiter, ce qui était l'objectif idéal. Il sera nécessaire d'envisager soit de la désorption à l'air chaud, soit une désorption sous vide. Les conditions d'intégration et le coût énergétique sont les facteurs déterminants dans cette approche.

INTÉGRATION ET SIMULATION GLOBALES. Calculer les conditions de fonctionnement d'une IGCC de 300 MW. Y intégrer de manière optimale une unité de réformage de CO, le procédé PSA et la liquéfaction. Le CENERG de l'École des Mines de Paris a réalisé l'intégration de l'unité de réformage, avec une recherche d'optimum énergétique, dans le simulateur d'IGCC mis au point sous Thermoptim. La prise en compte de l'unité de séparation et de la liquéfaction est effectuée également, sans intégration pour l'instant. Ce travail permet une première approche du bilan énergétique global.

COMPARAISON AVEC D'AUTRES TECHNOLOGIES. Identifier et suivre les travaux sur d'autres filières comparables, afin de situer comparativement nos travaux par rapport à ces filières (du moins qualitativement). Le LEMTA suit tout particulièrement les travaux concernant les cycles CO₂, c'est-à-dire des centrales où la combustion se fait en mélange oxygène + gaz de combustion recyclés. Ce dernier étant essentiellement du CO₂, aucune unité de séparation n'est nécessaire.

SÉQUESTRATION. Examiner les verrous de l'utilisation en récupération assistée du pétrole. Évaluer le potentiel de récupération et l'incidence sur le bilan global. Le LTMP a développé une approche thermodynamique qui permet de prédire si un gisement donné (dont la composition et les conditions thermodynamiques sont connues) est apte à la récupération améliorée par injection de CO₂. L'ICMCB a supervisé un travail d'inventaire et de mise au point sur les techniques et le potentiel de séquestration géologique.

Projets de Recherche



Stockage du vecteur hydrogène dans les nanostructures carbonées

Farida DARKRIM LAMARI (LIMHP, Villetaneuse), Patrick BERNIER (GDPC, Montpellier), Gilles FLAMANT (IMP, Font Romeu), Patrice GADELLE (LTPCM, Grenoble), Jin Bo BAI (MSS/MAT, Châtenay-Malabry)

Ce projet vise à améliorer les connaissances sur le stockage de l'hydrogène par adsorption dans les nanostructures carbonées sous pression du gaz. Nos efforts porteront en premier sur la synthèse des matériaux. Nous nous proposons de synthétiser par des techniques diverses mais connues depuis de nombreuses années et maîtrisées (arc électrique, ablation laser, ablation solaire, CVD), divers types d'échantillons, allant des nanotubes de carbone monofeuillet ou multifeuillets, aux nanofibres ayant diverses géométries et aux nanostructures intégrées dans des structures poreuses.

En deuxième lieu nous effectuerons les caractérisations des divers systèmes étudiés (structure, surface, texture) par différentes techniques de microscopie et de spectroscopie, ainsi que leur mise en forme afin de les préparer aux mesures d'adsorption.

Enfin nous mesurerons leur capacité d'adsorption sur un banc unique (20 MPa, 20°C) afin d'éviter les problèmes de reproductibilité liés à l'utilisation de divers bancs. Nous mettrons en place des collaborations en ce qui concerne la synthèse des matériaux jusqu'à la compréhension des phénomènes de base. Les difficultés expérimentales résident dans la reproductibilité de la synthèse des matériaux carbonés nanostructurés, dans l'amélioration du dispositif de stockage par adsorption sous pression et du banc de régénération des matériaux par traitement thermique. Nous étudierons la corrélation entre les performances et la structure des systèmes afin de définir de nouveaux matériaux optimisés.

La diversité des nanostructures étudiées permettra d'entreprendre un travail de simulation mettant en jeu leur géométrie afin de la corréler aux performances observées et donc de définir éventuellement le matériau idéal pour un objectif donné. Ce travail de simulation mené en parallèle avec l'expérimentation nécessitera aussi une approche théorique sur les mécanismes d'adsorption et de désorption de l'hydrogène. C'est donc un ensemble d'approches variées mais nécessitant une coopération étroite que nous voulons mettre en oeuvre.



Gestion thermique. Conception d'échangeurs et de réseaux

I/ Objectif général

Le projet de recherche présenté dans ce document concerne **les échangeurs multifonctionnels**. Ce sont essentiellement les travaux relatifs à l'étude des phénomènes fondamentaux intervenants dans le processus **d'intensification des transferts thermiques** notamment ceux couplés aux mélanges et réactions.

Le principe d'un échangeur multifonctionnel est de combiner au moins deux opérations de base au sein du même appareil. On citera par exemple les échangeur-réacteurs (échange de chaleur + réaction chimique) ou les condenseurs à reflux (échange de chaleur + séparation). De plus, des fonctions de récupération de chaleur peuvent être intégrées. La combinaison de plusieurs fonctions au sein d'un même équipement permet d'augmenter l'efficacité énergétique, de réduire la taille des appareils et de réduire les inventaires en fluide ce qui permet un meilleur contrôle du procédé et réduit les impacts environnementaux en cas de défaillance. **L'échangeur multifonctionnel constitue une rupture technologique**, notamment par le fait que certaines opérations qui sont actuellement réalisées en discontinu pourraient l'être en continu. On peut dans certain cas envisager des productions décentralisées avec des unités de taille nettement réduite.

Le travail proposé intègre aussi des aspects globaux ce qui permet de répondre aux besoins des industriels qui désirent développer et utiliser cette nouvelle génération d'échangeur-réacteur à des fins d'économie de matière et d'énergie.

Ce projet d'Action Concertée propose l'extension d'une plate-forme de test des échangeurs multifonctionnels industriels existants (GRETh, Grenoble), et d'en créer une autre pour les études plus fondamentales (Laboratoire de Thermocinétique, Nantes).

II/ Objectifs scientifiques

L'étude portera plus particulièrement sur l'analyse des mécanismes de transfert de masse et de chaleur dans les écoulements, laminaires ou turbulents, au sein de canaux de différentes géométries. Ceci permettra de caractériser le micro-mélange (réaction chimique) et le macro-mélange (transfert de chaleur), selon les caractéristiques des fluides et de la réaction. L'étude fine des écoulements et des transferts conduira à la mise en œuvre de techniques expérimentales pour les mesures locales en ligne telles que l'anémométrie à fil chaud, l'anémométrie L.A.S.E.R. à effet Doppler ou la PIV, mais fera également appel à des techniques plus innovantes, telles que la spectrophotométrie par fluorescence induite 3 couleurs (LEMETA, Nancy). Par ailleurs, une modélisation phénoménologique sera développée dans ce sens (CORIA, Rouen ; LMFA, Lyon).

Une approche globale sera réalisée pour optimiser l'intégration thermique et la gestion des fluides au sein de l'échangeur-réacteur dans le sens :

- d'obtenir un taux de mélange suffisant pour assurer une bonne réaction chimique et réduire la création de sous-produits dans le cas de réactions rapides ou instantanées,
- d'avoir un temps de séjour contrôlé et le plus homogène possible,
- de permettre le contrôle de la température de réaction par le biais d'un fluide secondaire,
- d'avoir des pertes de pression acceptables.

Une plate-forme pilote sera conçue en fin de projet pour être adaptée à la problématique des réactions rapides et fortement exothermiques (LGC, Toulouse)

III/ Partenaires

Laboratoire de Thermocinétique de Nantes (LTN), UMR 6607, Pr. Hassan Peerhossaini

Groupe pour la Recherche sur les Échangeurs Thermiques (GRETh, CEA Grenoble), Dr. Patrice Tochon

Laboratoire d'Énergétique et Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA), UMR 7563 CNRS, Pr. Michel Lebouché

Complexe de Recherche Interprofessionnelle en Aérothermochimie (CORIA), UMR 6614 CNRS, Pr. Michel Gonzales

Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique (LMFA), UMR 5509 CNRS, Pr. Philippe Carrière

Laboratoire de Génie Chimique (LGC) UMR 5503 CNRS/INPT/UPS, Pr. Christophe Gourdon



Les répartiteurs de chaleur diphasiques associés aux Pemfc

Participants :

Le LET de l'ENSMA (porteur du projet)
Le CETHIL de l'INSA de Lyon
Le LE de l'Université Paul Sabatier de Toulouse
Le LEMTA de Nancy
Le LAAS de Toulouse

Le développement des piles à combustible pour la production d'électricité dans les systèmes statiques ou embarqués est encore aujourd'hui freiné par les problèmes de régulation thermique du cœur même des piles.

Les piles à combustible par membrane échangeuse de protons (PEMFC) nécessitent une température d'utilisation comprise entre 60 et 90°C. D'autre part, le rendement de ce type de pile est de l'ordre de 60%, ce qui implique que 40% de la puissance doit être évacuée par un système de refroidissement spécifique (de l'ordre de 0,5 Wcm⁻²). On constate donc que la difficulté de régulation thermique est liée d'une part à l'importance des flux de chaleur mis en jeu, et d'autre part à la relativement basse température de fonctionnement exigée.

Les différentes réactions électrochimiques, et en particulier leur cinétique, à l'intérieur de la pile sont conditionnées par la température mais également par les gradients de température longitudinaux au niveau des électrodes. Ces dernières ont une durée de vie d'autant plus importante que leur température est constante dans le temps et uniforme dans l'espace.

Tous ces impératifs nous amènent à repenser le système usuellement utilisé pour refroidir le cœur des PAC (circulation d'eau ne permettant pas d'assurer une homogénéité spatiale de la température et une homogénéité temporelle de celle-ci lors de brusques sollicitations de puissance aux bornes de la PAC).

Le projet va se focaliser sur un refroidissement opéré par voie diphasique susceptible d'homogénéiser le champ de température dans le cœur tout en réduisant l'encombrement dévolu à cette fonction (près de 80% du volume de la PAC dans un système conventionnel)

Les principales pistes envisagées porteront sur :

- les diffuseurs thermiques diphasiques rainurés dans le Silicium (associés à de l'eau) permettant de couvrir les petites PAC (cœur de 5*5cm).
- les diffuseurs thermiques diphasiques rainurés dans le Cuivre (associés à de l'eau) permettant de couvrir les PAC de cœur 20*20cm.
- les diffuseurs thermiques diphasiques comportant un matériau poreux rainuré en Cuivre (associés à de l'eau) pour les cœurs de 20*20cm.
- les diffuseurs thermiques diphasiques en Aluminium composés de picots jouant le rôle de structure poreuse (associés à du N Pentane) pour des surfaces de 20*20cm.

Pour chacun de ces concepts on réalisera des prototypes qui seront testés sur des moyens expérimentaux similaires permettant une comparaison aisée des différentes solutions. De plus ces prototypes pourront être mis en situation réelle dans les piles expérimentales de cœur 5*5cm du LET et 20*20cm du LEMTA.



Cycles thermochimiques pour le transport de chaleur et de froid à longue distance

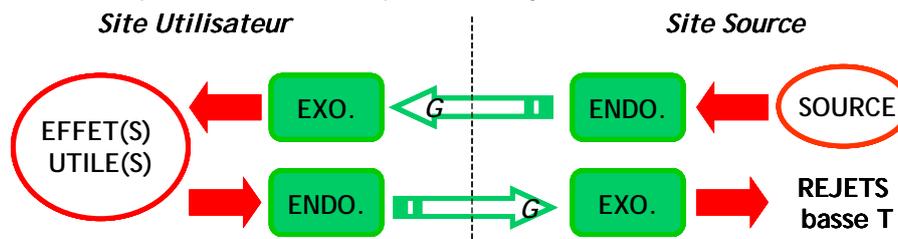
Nathalie Mazet, Driss Stitou (IMP-CNRS Perpignan)
Lingai Luo (LOCIE Chambéry)
Daniel Tondeur (LSGC-CNRS Nancy)

Le transport de chaleur et de froid à longue distance (> 10 kms) est un enjeu important pour une meilleure gestion énergétique et la récupération de rejets thermiques.

Les réseaux actuels de chaleur et de froid sont basés sur le transport de chaleur sensible donc de distance limitée (<5 km). Par contre, le transport d'une phase gazeuse sur de longues distances, comme le gaz naturel ou l'hydrogène et sa distribution sont bien connus et optimisés.

L'idée de base de ce projet est donc de remplacer le transport de chaleur par un transport de gaz, ce même gaz étant mis en jeu dans 2 processus physico-chimiques : respectivement endothermique sur le site siège de la source de chaleur, et exothermique sur le site utilisateur. Les sorptions largement étudiées à l'IMP et au LSGC, sont des processus tout à fait adaptés à cet objectif.

Ces sorptions sont renversables et permettent donc le retour du gaz. Le procédé est donc cyclique. Cette phase de "régénération" implique alors un effet endothermique sur le site utilisateur, et ainsi la possibilité de réaliser une production de froid à une température intéressante par un choix judicieux des éléments actifs.



Ce concept de transfert de chaleur longue distance remplacé par un transfert de gaz minimise donc les pertes en ligne, et autorise une multi-fonctionnalité intéressante. De larges gammes de températures opératoires sont possibles selon le processus et le composant actif sélectionné.

Dans certains cas, en particulier pour la revalorisation thermique de rejets (cad $T_{\text{rejet}} > T_{\text{source}}$), des systèmes plus complexes ont été définis. Ils associent plusieurs couples d'éléments endo-exothermiques en cascades : on peut ainsi adapter les conditions opératoires du système complet aux source/puits disponibles. Ces cascades impliquent un couplage thermique entre 2 éléments, l'un endo et l'autre exothermique, en un "co-réacteur" globalement autotherme (idéalement). La gestion de cet élément autotherme est un point crucial dans ce procédé cyclique

Une première étude, en 2002, a conduit à la sélection de réactifs assurant une production de froid à -30°C à partir d'une source à 190°C , et la conception de réacteurs modulaires adaptés.

Sur cette base, ce PR va s'articuler autour des points suivants :

► Validation du concept sur la base des réactifs sélectionnés

▷ Réacteurs autothermes modulaires :

- analyse statique du fonctionnement autotherme idéal,
- analyse dynamique et cyclique du fonctionnement autotherme réel (incluant pertes, phases intermédiaires...) => modélisation, simulation dynamique.

▷ Expérimentation en taille réduite, des réactifs et concept de réacteur proposés

- => validation du concept, support à la modélisation, et validation des simulations.

► Analyse du procédé global

▷ Transport de gaz : impact sur conditions opératoires, sur bilans énergétiques et exergétiques globaux.

▷ Modélisation dynamique du procédé complet en fonctionnement cyclique (réacteurs autothermes en fonctionnement réel, transport de gaz, phases intermédiaires...).

- Simulation et analyse des performances du procédé (énergétiques, exergétiques, densité énergétique...) selon conditions opératoires, configuration du réacteur...

► Évaluation de l'intérêt de procédés thermochimiques pour le transport de chaleur/froid longue distance, analyse thermodynamique, comparaisons avec les systèmes "concurrents".



Résumé du programme entrepris

OBJECTIFS (Rappel)

Élaboration de modèles transitoires des composants de machines à cycles inverses (machines à froid, climatiseurs, pompe à chaleur).

Les divers types de machines envisagés sont :

- les machines à compression de vapeur (fluides classiques et naturels) ;
- les machines à cycles discontinues (sorption par exemple) ;
- les machines incluant un stockage thermique (relation possible avec d'autres P.R.).

RÉALISATIONS

1^{ère} phase : 1^{er} semestre 2003

Concertation entre les partenaires potentiels pour harmonisation des propositions de recherche qui s'articulent autour de deux grands thèmes :

a) Étude de dynamique tout ou rien (dynamiques discontinues)

- cas des machines à compression à CO₂ (CETHIL)
- cas des machines à adsorption charbon actif – CH₃ OH (CO₂) (LEMTA)

b) Étude en régime variable (régime fluctuant, charge variable) :

On vise ici une commande optimale

- régime variable d'une machine à compression de vapeur (LATER, en relation avec CIAT)
- gestion en régime variable d'un système frigorifique (CE MAGREF).
- utilisation et développement de progiciels existants : THERMOPTIM (École des Mines de Paris).

2^{ème} phase : 2^{ème} semestre 2003

Développement des premiers travaux par chaque acteur. Une première **réunion de synthèse et d'orientation** reste en cours de mise en place et définition (date envisagée fin du 1^{er} semestre 2004).

PERSPECTIVES

Résultats attendus :

- **modèles robustes** adaptés à l'étude hors nominal des machines à cycles inverses et **validation** ;
- **modèles réduits** pour les machines à compression de vapeur et à sorption, en vue du **contrôle-commande hors nominal**.

Nouvelles machines : - cycles hypercritiques à CO₂ ;
 - cycles à adsorption ;
 - machines à stockage thermique intégré.

PARTICIPANTS

5 équipes, pour 15 participants :

- CETHIL, UMR 5008, INSA, Lyon
(3 personnes ; A. LALLEMAND, Pr.)
- URGPA, ANTONY
(2 personnes ; J. GUIPART, CR)
- École des Mines, Paris
(2 personnes ; R. GICQUEL, CR)
- LATEP, Université, Pau
(5 personnes ; J. CASTAING-LASVIGNOTTE, MDC)
- LEMTA, UMR 7563, Nancy
(3 personnes ; M. FEIDT, Pr.)



COPIFAC
SYSTEME INNOVANT DE COMBUSTION PROPRE DANS LES FOYERS A CYCLE COMBINE ET FLEXIBLE AUX NOUVEAUX COMBUSTIBLES
(gaz de synthèse issus de la gazéification de la biomasse et de résidus industriels)

Coordonnateur : Jean-Michel MOST, LCD UPR 9028 – ENSMA, Poitiers
 Michel CHAMPION, LCD UPR 9028 – ENSMA, Poitiers
 Dany ESCUDIE : CETHIL, INSA Lyon
 Mourad BOUKHALFA, David HONORE et Françoise BAILLOT, CORIA, Rouen
 Nasser DARABIHA, EM2C, ECP, Chatenay Malabry

L'objectif de ce projet est de développer des systèmes innovants de combustion propre pour des foyers à cycle combiné de co-génération électricité - chaleur, et l'identification des verrous liés au transfert de ces technologies vers des applications industrielles centralisées ou délocalisées. La flexibilité des brûleurs au type et à la composition du combustible (gaz de synthèse issus de la gazéification de la biomasse, résidus industriels ou domestiques, charbon ou hydrocarbures chargés en hydrogène) est particulièrement recherchée.

Les études sont développées dans les conditions d'apparition du nouveau régime de "combustion sans flamme (ou diluée)" sur des dispositifs modèles représentatifs d'unités de type IGCC. Le procédé intègre un mode innovant de combustion à haut rendement avec des émissions de polluants très réduites.

Ce régime de fonctionnement des fours et chaudières est apparu il y a une dizaine d'années. Il est observé lors du préchauffage de l'air au-dessus de la température d'auto-inflammation du combustible dans des brûleurs régénératifs adoptant le concept d'étagement du combustible ou du comburant. Une très forte recirculation des gaz brûlés est alors induite au sein de l'enceinte thermique ce qui dilue fortement les réactifs avant combustion. Le régime se caractérise par :

- ✓ une absence de structure de flamme visible ;
- ✓ une grande homogénéité temporelle et spatiale en température dans la chambre de combustion avec notamment une absence de pics de forte température ;
- ✓ un faible bruit de combustion ;
- ✓ et surtout, une réduction d'un ordre de grandeur, des émissions de NOx et de particules

Quatre projets sont menés par les différentes équipes.

- La stabilisation de la flamme est étudiée dans un brûleur à contre-courant. Pour les différents paramètres de fonctionnement (température et composition - taux de dilution - des réactifs, turbulence), les caractéristiques de la flamme sont déterminées afin de fournir des informations pour la simulation numérique. Une modélisation mono-dimensionnelle de la combustion laminaire est étudiée en introduisant une cinétique chimique détaillée et un transport multi-espèces. Les conditions de développement de la flamme sont alors étudiées en fonction du type de réactifs et des radicaux dans les gaz chauds. Puis, un modèle de la combustion des réactifs dilués spécifique est proposé en présence de turbulence dans les gaz brûlés. Ce régime de combustion peut conduire à l'existence d'une zone de combustion contrôlée par la cinétique chimique, au voisinage du plan d'arrêt où la vitesse axiale est nulle, ce qui exige une approche nouvelle.

- Lors de l'étude de la transition du régime lifté (régime limite) vers la combustion diluée, il s'agit de quantifier l'influence du mélange en présence de dilution et de préchauffage sur le régime de combustion. Une expérience est conçue spécialement.

- L'étude suivante vise à caractériser l'impact des caractéristiques de combustion sur les transferts de chaleur. On s'intéresse alors à l'effet d'une combustion très diluée sur l'homogénéité du transfert d'énergie vers une charge ou vers les parois du foyer.

Enfin, une étude est effectuée sur une installation pilote. Ce travail s'attache à déterminer les temps caractéristiques aérodynamiques et chimiques, leur comparaison permettra la classification de ce mode de combustion au sein des modèles de la littérature.



Assemblage et étude d'une capacité hybride utilisant des électrodes de supercondensateur à grande surface spécifique avec un diélectrique à haute tension de claquage

Participants :

- Centre InterUniversitaire de Recherche et d'Ingénierie des MATériaux (CIRIMAT), UMR CNRS 5085 :
 - o Groupe «Revêtements et traitements de surface» : P. Simon (MCF, coordonnateur)
 - o Groupe «Nanocomposites et nanotubes de carbone» : E. Flahaut (CR)
- Laboratoire de Génie Electrique de Toulouse (LGET)
 - o Groupe «Matériaux et phénomènes non linéaires» J.P. Cambronne (PR), T. Lebey (DR)

Ce travail a pour but de concevoir des systèmes originaux de stockage de l'énergie : des condensateurs hybrides à haute densité d'énergie. Il consiste à associer deux électrodes de grande surface spécifique, à base de matériaux carbonés, entre lesquelles sera placé un diélectrique. Par matériaux finement divisés, nous entendons des matériaux de surface spécifique comprise entre 500 et 2000 m²/g. L'objectif est de tirer profit de la surface développée par une électrode constituée de ces matériaux pour augmenter les valeurs de capacités traditionnellement rencontrées dans les condensateurs classiques ou électrochimiques.

Les premiers essais seront réalisés avec du charbon activé, matériau de grande surface spécifique et facilement disponible. La finalité du projet est d'utiliser les nanotubes de carbone qui, bien que développant une surface spécifique beaucoup plus faible, ont une porosité inter-tubes beaucoup plus accessible et une très grande conductivité électronique.

Le principal verrou technologique est la maîtrise de l'interface de contact entre le diélectrique et la surface développée des électrodes poreuses. Le diélectrique devra présenter une surface de contact la plus élevée possible avec l'électrode, tirer profit de la grande surface spécifique des électrodes carbonées. La mise en œuvre du diélectrique devra être particulièrement étudiée pour que :

- a) la surface de contact entre le carbone et le diélectrique soit la plus importante possible,
- b) la continuité électrique entre le collecteur de courant et le matériau carboné soit assurée. En particulier, il ne faudra pas que le diélectrique enrobe complètement le matériau carboné, ce qui aurait pour effet de l'isoler électriquement.

Le matériau diélectrique de départ pourra être un polymère à bas point de fusion, tel que le polyéthylène, auquel on préférera plus vraisemblablement un matériau se présentant sous une forme visqueuse voire liquide, tel que des gels du type silicone. La technique de l'imprégnation sous vide forcera le matériau diélectrique à pénétrer à l'intérieur de la structure poreuse de l'électrode carbonée. Cette technique, simple à mettre en œuvre, permettra d'obtenir rapidement des premiers résultats qui donneront des valeurs de références. D'autres solutions seront ensuite étudiées, tels que la polymérisation in-situ du diélectrique à partir d'une solution de monomère ou le dépôt par cataphorèse.

Les performances qui sont visées pour ces objets sont intermédiaires entre les supercondensateurs et les condensateurs diélectriques. Les capacités surfaciques que peuvent atteindre les supercondensateurs sont de l'ordre de 1 F/cm² par électrode, sous une tension maximale de 2,5 V ; les condensateurs diélectriques ont des tensions de fonctionnement de plusieurs centaines de V, mais avec des capacités beaucoup plus faibles, c'est-à-dire de l'ordre du $\mu\text{F}/\text{cm}^2$.

Nous envisageons de réaliser dans ce présent projet des condensateurs hybrides dont la capacité surfacique sera de l'ordre du mF/cm² fonctionnant à des tensions de plusieurs dizaines de volts.



Capacité de puissance recyclables et sécurisées

Thierry Brousse (coordonateur), Yves Scudeller, Philippe Guillemet, Franck Tancret (Laboratoire de Génie des Matériaux (LGM) – Polytech' Nantes).

Laure Monconduit, Frédéric Favier, Deborah Jones, Jacques Rozière (Laboratoire des Agrégats Moléculaires et Matériaux Inorganiques, Université Montpellier II, UMR-CNRS 5072).

Patrice Simon, Pierre-Louis Taberna (Centre Inter-Universitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux, université de Paul Sabatier, UMR-CNRS 5085).

La technologie de propulsion des véhicules électriques et hybrides nécessite le développement de sources d'énergie capables, sur une durée de vie de plusieurs années, de fournir une grande autonomie de roulement (batterie) et, de façon cyclique, de fortes puissances instantanées. Cette dernière fonction peut être parfaitement remplie par un supercondensateur, système électrochimique capable de délivrer dans des temps très courts des puissances élevées. Les supercapacités sont également envisagées dans certaines applications, comme les tramways sans caténaire, pour assurer seules la propulsion électrique. Les électrodes pour supercondensateurs sont principalement à base de trois types de matériaux : polymères conducteurs, charbon actif et dioxyde de ruthénium. Le coût des polymères conducteurs et de RuO_2 est encore élevé. La technologie à base de charbon actif reste, à l'heure actuelle, la seule à répondre aux impératifs de coût fixé par le marché. Malheureusement, cette technologie utilise principalement comme solvant de l'acétonitrile dont la toxicité et le bas point d'ébullition constituent des obstacles majeurs à la sécurité et à la fiabilité des dispositifs.

Parmi les matériaux non toxiques à l'étude, on peut citer les oxydes de manganèse déjà largement utilisés dans l'industrie des piles. L'avantage de ces matériaux réside dans leur utilisation en solution aqueuse neutre respectueuse de l'environnement. On sait que les supercapacités réalisées à partir de deux électrodes de MnO_2 , dont la capacité spécifique moyenne est de 100 à 200 F/g, possèdent une fenêtre électrochimique relativement étroite (1V maximum) ne permettant pas d'obtenir des puissances élevées.

Le projet CAPRYS vise à associer une électrode positive de MnO_2 à une électrode négative en carbone activé (ou un autre oxyde) dans un électrolyte aqueux neutre permettant une augmentation importante de la fenêtre électrochimique. Les premiers résultats sur un tel système hybride montrent la possibilité d'opérer sur plusieurs dizaines de milliers de cycles entre 0 et 2,2 V, avec des performances tout à fait comparables aux dispositifs commerciaux actuels. L'avantage du système hybride réside dans l'utilisation d'électrolyte aqueux non toxique et de matériaux recyclables et à faibles coûts. Le projet CAPRYS a donc pour but la conception de capacités électrochimiques de puissance, recyclables, non nocives pour l'environnement, présentant les meilleures garanties de sécurité thermique en vue de leur intégration dans les systèmes de propulsion électrique type tramway. Les différentes étapes du projet sont :

- Optimisation des méthodes de synthèse d'oxydes (MnO_2 , Fe_3O_4 , etc...) nanostructurés ou mésostructurés.
- Sélection de carbones activés présentant de bonnes performances électrochimiques en milieu aqueux neutre.
- Association de matériaux de type oxydes « actifs » ou carbone activés avec des matériaux organiques fonctionnalisés.
- Tests de systèmes hybrides (deux électrodes différentes : carbone activé/ MnO_2 par exemple)
- Développement d'un dispositif de caractérisation thermique des assemblages et matériaux constitutifs (conductivité thermique et capacité calorifique).
- Élaboration d'outils de conception et de modélisation couplée thermique/électrochimique afin d'adapter les structures étudiées pour limiter les risques d'endommagement.
- Fabrication d'un prototype hybride (1000 F/2V) délivrant des puissances compatibles avec l'application visée

Les outils et matériaux développés dans le cadre de ce projet devront servir à la mise au point de nouvelles générations de Supercapacités Électrochimiques de puissance constituées de matériaux d'électrodes recyclables, non-toxiques fonctionnant avec un électrolyte en solution aqueuse neutre.

Collaboration internationale associée : LGM/LEA (UQAM)

Projet scientifique «apports des nanotechnologies aux matériaux pour le stockage de l'énergie» (59^e commission permanente de coopération franco-québécoise), avec le Professeur Daniel Bélanger, laboratoire d'électrochimie appliquée, département de chimie, Université du Québec à Montréal.



***Confluence des prospectives énergétiques et macroéconomiques
dans la perspective d'un développement durable***

Projet de recherche sur le thème *Modélisation économique de long terme : le progrès technique et les mutations énergétiques en vue du développement durable.*

F. Gherzi (CIRED), P. Criqui (LEPII-EPE), C. Raux (LET)

La modélisation de long terme des relations entre énergie et économie est confrontée à un cahier des charges exigeant, étendu à un ensemble de prospectives imbriquées :

- Projection de l'offre et de la demande d'énergie, ainsi que des émissions polluantes («externalités») associées,
- Coûts marginaux et totaux de l'infléchissement de ces projections, à contexte macroéconomique constant,
- Besoins d'investissement correspondants,
- Introduction des effets en retour macroéconomiques : propagation des effets-prix par la matrice des consommations intermédiaires, répercussion sur le secteur industriel et effets de compétitivité, propagation sur le «bien-être» social, en fonction des modalités de l'infléchissement (évolution de la fiscalité, subventions, compensations re-distributives, politiques monétaires), impact sur les grands équilibres macroéconomiques (prélèvements obligatoires, endettement, termes de l'échange).
- Influence des incertitudes de long terme sur les politiques de court et moyen terme : les approches à la modélisation doivent être assez souples pour évaluer les valeurs d'option et les valeurs d'information propres à chaque stratégie d'infléchissement des trajectoires.

Une grande partie de ces problématiques sont liées à la question de l'articulation entre prospectives technologique et macroéconomique. Cette question est au cœur du projet de recherche ENEC 2050 (ENergie/Économie 2050), déclinée selon un triple objectif :

- Synthèse et analyse critique des projections énergétiques de long terme les plus discutées sur la scène scientifique internationale ;
- Développement d'une plate-forme de modélisation réunissant le modèle technico-économique POLES et le modèle d'équilibre général calculable IMACLIM, pour la production propre de scénarios couplés énergie/économie de long terme ;
- Étude détaillée des déterminants de long terme de la demande énergétique, et notamment de celle de transports, ainsi que des modalités de leur prise en compte dans la plate-forme de modélisation IMACLIM-POLES.

Partenaires :

Centre International de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED, UMR8568, coordinateur)

Laboratoire d'Économie de la Production et de l'Intégration Internationale – Énergie et Politiques de l'Environnement (LEPII-EPE, FRE2664)

Laboratoire d'Économie des Transports (LET, UMR5593)



Projet ETHEL « Énergie, Transport, Habitat, Environnement, Localisations »

- Laboratoire d'Économie des Transports LET, UMR 5593, Lyon,
Charles Raux, charles.raux@let.ish-lyon.cnrs.fr
- Laboratoire Théorie des Mutations Urbaines LTMU, UMR 7136, Champs sur Marne,
Jean-Pierre Traisnel, Jean-Pierre.Traisnel@univ-paris8.fr
- Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement CIRED, UMR N° 8568,
Nogent sur Marne,
Franck Nadaud, nadaud@centre-cired.fr

Ce projet devrait conforter la connaissance du lien entre énergie, transports, localisations et type d'habitat qui est aujourd'hui encore assez mal maîtrisé. Or il est acquis que c'est dans la maîtrise des relations qu'entretiennent les deux secteurs de l'habitat et des transports que se joue l'efficacité des politiques publiques, le cumul des consommations d'énergie dans le parc résidentiel et pour le transport des personnes atteignant 45% en 1998. Il convient de préciser que ces deux secteurs connaissent des évolutions préoccupantes en matière d'émissions de gaz à effet de serre liées aux usages de l'énergie. Par exemple l'accroissement des distances parcourues et des surfaces chauffées, dans un tissu urbain diffus de type pavillonnaire, contribue à la dérive des consommations d'énergie.

La participation de plusieurs laboratoires disposant d'une capacité d'expertise sur ces deux secteurs est une condition essentielle pour obtenir des avancées significatives. Après un état de l'art en matière de prospective et de bilans énergétiques, les équipes élaboreront une méthode de scénarios, permettant de situer les enjeux en termes de variantes, puis construiront un cadre de modélisation destiné à simuler les effets des différentes hypothèses retenues sur les modes de vies et les politiques publiques. Le travail méthodologique aboutira ainsi à des outils de prospective utiles pour la décision publique, permettant l'analyse des impacts des leviers stratégiques dont disposent les pouvoirs publics face aux engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'un facteur 4 à l'échelle nationale et à l'horizon 2050. L'applicabilité du travail résultera de l'identification et de la quantification des enjeux énergétiques relatifs aux transports, aux localisations et à l'habitat, par la publication d'indicateurs quantitatifs environnementaux, spatiaux économiques et sociaux, ainsi que des marges de manœuvres en termes de politiques publiques (politiques fiscales, d'aménagement du territoire).

Sur le plan scientifique, le résultat attendu est le progrès méthodologique en matière de modélisation de moyen et long terme de l'impact de facteurs sociétaux et technologiques sur les comportements étudiés.

Projets Exploratoires



Luc BROHAN*, Eric PUZENAT*, Annabelle ROUET*, Mireille RICHARD-PLOUET,
Jean Michel NUNZI^α, David TROADEC^α

* Institut des Matériaux Jean Rouxel *Laboratoire de Chimie des Solides (LCS)*, CNRS-UMR 6502
2, rue de la Houssinière BP 32229, 44322 Nantes Cedex 03 luc.brohan@cnrs-imn.fr
Tél : 02 40 37 39 35, Fax : 02 40 37 39 95

^α Laboratoire des Propriétés Optiques des Matériaux et Applications (POMA), UMR-CNRS 6136
ERT Cellules Solaires Photovoltaïques plastiques Université d'Angers,
2, Boulevard Lavoisier 49045 ANGERS, jean-michel.nunzi@univ-angers.fr
Tél : 02 41 73 53 64, Fax : 02 41 73 52 16

Objectifs du projet

A partir de précurseurs solubles dans des solvants polaires, nous avons récemment développé de nouveaux procédés de synthèse permettant l'obtention de polymères oxygénés du titane ayant des structures et propriétés originales. Ces nanomatériaux possèdent des structures à caractère 1D marqué ($\varnothing \approx 1$ nm) et des propriétés d'absorption particulières puisqu'ils absorbent dans le visible. Nous proposons de réaliser des dépôts de films minces de ces photopolymères et d'étudier leurs propriétés physico-chimiques. Ce projet exploratoire devrait permettre de concevoir de nouvelles cellules photovoltaïques exemptes de photosensibilisateur, des systèmes photoélectrochromes ou encore des photobatteries en raison de la réversibilité des phénomènes d'oxydo-réduction mis en jeu.

Programme de recherche

Développer des synthèses adaptées à la technologie couche mince

Les **interactions entre surfaces et les propriétés des interfaces** pouvant **conditionner les performances des matériaux et l'adhérence du dépôt au support**, il apparaît important de **développer de nouvelles méthodes de synthèse adaptées à la fabrication des dispositifs par un contrôle de la monodispersité et de la charge de surface des nanoparticules**. Au cours de ce travail qui consiste à déposer, par **dip-coating**, des **solutions monodisperses de précurseur** (spectroscopie de corrélation de photons), nous tenterons de répondre à la question suivante : comment la structure du précurseur inorganique (charge de surface, degré de polycondensation, taille des nanoparticules...) influe sur la morphologie (épaisseur, porosité, surface spécifique, structure, adhérence...) du film déposé ?

Acquérir une meilleure compréhension de la photoactivité de TiO_2

Afin d'accéder à une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans les applications photovoltaïques de TiO_2 , il importe d'**obtenir des informations à l'échelle atomique sur la nature des espèces (aquo, hydroxo, oxo) présentes à la surface de l'oxyde**. Les oxydes semiconducteurs **structurés à l'échelle du nanomètre** possèdent une forte densité de sites actifs en raisons d'un rapport surface/volume élevé. Cette caractéristique devrait nous permettre d'une part d'accéder à des informations sur la photoactivité (EXAFS, XANES) et d'autre part d'observer des phénomènes quantiques (**effets excitoniques exaltés**). En effet, lorsque la structuration de l'oxyde métallique intervient jusqu'à une échelle ou le confinement quantique des états électroniques peut être attendu ($<10\text{nm}$), ces oxydes possèdent une structure électronique modifiée puisque les limitations quantiques réduisent la largeur de bande.

Réalisation d'une cellule photovoltaïque et d'une photobatterie

Nous proposons de réaliser une **cellule photovoltaïque** basée sur celle de Grätzel dans laquelle le photo-sensibilisateur organique sera remplacé par un **polymère inorganique photosensible**. Nous mesurerons en particulier l'efficacité de conversion du photo-courant incident en fonction de la longueur d'onde d'excitation. Nous déterminerons la **caractéristique I/V** du système sous des conditions d'illumination correspondant à nos latitudes et comparerons nos résultats à ceux des cellules solaires connues (Grätzel et sensibilisateur organiques).

Le principal objectif de ce projet concerne la **réalisation d'une photo-batterie à partir des variétés Oxydées et Réduites des photopolymères**. Nous testerons les performances de la photobatterie et tenterons de **préciser les couples Red-Ox** mis en jeu lors de l'absorption des photons afin d'**optimiser son fonctionnement en cyclage**. La **connaissance de la charge de surface des polymères, avant et après irradiation**, s'avère d'une importance capitale. A cette fin, des mesures réalisées à l'IMN (UMR 6502), seront effectuées par zétamétrie sur les précurseurs en solution (avec ou sans irradiation et à différents pH) et par AFM/STM sur les couches minces.



Récupération de l'énergie des vagues : le projet SEAREV
Système Autonome Électrique de Récupération de l'Énergie des Vagues

Le projet SEAREV vise à produire à moyen terme (5ans) un prototype de récupérateur d'énergie des vagues de l'ordre de 1MW crête. La première phase dite phase Laboratoire a commencé en 2003, et durera 3 ans, l'Action Concertée Énergie 2003 apportant une partie du financement de la première année. Son objectif est la conception, l'optimisation et la réalisation d'un démonstrateur à l'échelle 1/15 qui sera testé dans la cuve à houles multidirectionnelles (30mx50m) du LMF.

Trois UMR sont associées à ce projet :

- Le Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'ECN (Nantes) pilote le projet. La récupération de l'énergie des vagues est un de ses thèmes de recherche depuis plus de vingt ans (6 thèses depuis 1983, 2 en cours) Le porteur du projet (A.Clément) a une longue expérience dans le domaine. Il a participé au Réseau Européen WAVENET dans le cadre du 5eme PCRD, et représentera le LMF dans les deux projets CA-OE et WAVETRAIN qui démarrent sur ce thème dans le 6^{ème} PCRD.
- L'Institut de Recherche en Communication & Cybernétique de Nantes (IRCCyN) apportera son concours pour la partie contrôle de l'engin, les études amonts entreprises par le LMF sur le sujet ayant montré tout l'intérêt d'un contrôle sophistiqué au point de vue de l'efficacité énergétique de ces systèmes
- Le SATIE (Systèmes & Applications des Technologies de l'Information et de l'Énergie), Laboratoire de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan à Bruz s'intéressera à la partie générateurs électriques puisque le mode de transformation de l'énergie mécanique à partir de mouvements de très grandes périodes (typiquement 9s) et d'efforts très importants en énergie électrique utilisable demande des solutions innovantes.

Depuis Juillet 2003, la partie hydrodynamique a progressé. L'équipe a sélectionné le principe finalement retenu (un dossier de valorisation en cours de rédaction sera déposé prochainement au CNRS). Les équations de comportement du système flottant et de son mécanisme interne de récupération ont été écrites (en approche non-linéaire pour ce qui concerne les mouvements du flotteur). Un des deux doctorants de l'équipe SEAREV/LMF s'est attaché à l'optimisation multi-paramètres multi-objectifs avec contraintes de la forme et des caractéristiques mécaniques de l'engin en utilisant un code fondé sur les algorithmes génétiques. Dans ce travail le noyau hydrodynamique est traité pour le moment dans l'approche linéarisée (petits mouvements) sachant que le second doctorant de l'équipe, qui a commencé en Octobre 2003, développera un code de comportement du flotteur en approche non-linéaire.

Un montage de Laboratoire de type double-pendule représentant une version mécanique simplifiée du module SEAREV a été défini pour que l'IRCCyN puisse travailler à l'optimisation du contrôle d'un système réel équivalent sans attendre d'avoir à disposition la maquette finale (délai un an et demi à deux ans). Un post-doc financé par la Région Pays de la Loire commencera ce travail en Janvier 2004.

Enfin une étude intitulée «Générateur électrique combinant les ressources du soleil, du vent et de la houle, et comprenant un dispositif de stockage» a été réalisée sur cette période par le SATIE et le LMF. Il s'agissait de montrer, sur une étude de cas réel en l'occurrence l'île d'Yeu, comment la combinaison de sources d'énergie renouvelables de dynamiques différentes, associées à un stockage de capacité à déterminer (paramètre de l'étude) pouvaient subvenir au fil de toute une année (1999) aux besoins d'une communauté de 5000 habitants.

Publications SEAREV depuis Juillet 2003

«Générateur électrique combinant les ressources du soleil, du vent et de la houle, et comprenant un dispositif de stockage». Rapport final pour ADEME, Nov. 2003. par les équipes SEAREV du SATIE (UMR) et du LMF(UMR6598).

A. Babarit, A.H. Clément, G. Duclos : *Power take off damping optimisation with regard to wave climate*. soumis à la Conférence : Offshore Mechanics & Arctic Engineering, (Vancouver 2004).

A. Babarit, G. Duclos, A.H. Clément : *Comparison of latching control strategies for a heaving wave energy device in random sea*. Présenté à 5th European Wave Energy Conference (Cork Oct.2003), et soumis à *Applied Ocean Research*.

A. Babarit, H. Ben Hamed, A.H. Clément, V. Debusschere, G. Duclos, B. Multon, G. Robin. *Simulation of the electric self-sufficiency of an Atlantic island supplied by offshore wind and wave renewables associated with a medium scale local energy storage*. Soumis à International Conference Offshore and Polar Engineering (Toulon 2004).



Étude des procédés de gazéification de la biomasse et de résidus industriels intégrés à un système de co-génération de type IGCC

Jean-Michel MOST, LCD UPR 9028 – ENSMA –Poitiers
Jacques LEDE, LSGC – NANCY

Les systèmes conventionnels de production d'énergie dans les foyers industriels doivent se diversifier, devenir flexibles au combustible par l'introduction d'une part croissante de biomasse pour la préservation des ressources naturelles en hydrocarbures, et accroître leur rendement afin de réduire les rejets de CO₂ de polluants (NO_x, SO_x, suies, particules,...) dans l'atmosphère.

L'objectif de la première étude de BIOCOPAC est de favoriser les échanges de compétences par le rapprochement de trois communautés scientifiques : biomasse - combustion - systèmes thermiques industriels. Un procédé de gazéification de la biomasse ou des déchets, couplé à une chambre de combustion (turbine à gaz, chaudière ou moteur) au sein de procédés industriels, ou semi-industriels délocalisés doit être défini pour la co-génération d'électricité – chaleur (– et froid).

Lors de la production des gaz de synthèse (mélange CO et H₂), l'unité de gazéification de biomasse, charbon, résidus ou déchets industriels doit être étudiée globalement en prenant en considération le couplage du pyrolyseur-gazéifieur avec le combustor lui-même (composition, débit, température, pression des gaz de synthèse issus de la gazéification). Des verrous scientifiques et technologiques se dressent alors, et différentes filières doivent être envisagées :

- la filière biomasse pour la production d'énergie qui fonctionne déjà en Europe du Nord : aspects économiques, viabilité pour la production d'électricité, conséquences environnementales ;
- les filières directes (chaudières à bois et dérivées) avec prise en compte de l'approvisionnement, et semi-directes pour la combustion du charbon de bois ;
- les filières biologiques (compostage, digesteur, méthanisation y compris les gaz de décharge) ;
- les filières de conversion haute température (gazéification à l'air, oxygène, vapeur d'eau), en cycle combiné avec contrôle des goudrons (combustion en lit fixe ou fluidisé circulant,...).

Ce PE identifiera les verrous rencontrés et proposera un système optimum. Un PR devrait être proposé à l'issue des réflexions entamées.

La seconde étude concerne la «Maîtrise de la biomasse» pour la production de gaz de synthèse par gazéification et son utilisation dans trois techniques : les piles à combustibles, les centrales à co-génération en IGCC, les moteurs HCCL.

La démarche générale repose sur l'existence de trois principaux postes de recherche : maîtrise des processus de décomposition thermo-chimique de la biomasse (MB), maîtrise des réacteurs de pyrolyse-gazéification (MR) et maîtrise des effluents et de leur pureté (ME). Un dialogue régulier est établi entre ces postes. L'objectif de cette réflexion est de rechercher les conditions permettant de se rapprocher au mieux des spécificités requises par telle ou telle utilisation des produits de gazéification.

Les dispositifs mis au service du projet par les différentes équipes sont très complémentaires. Ils couvrent l'ensemble des conditions expérimentales habituellement rencontrées aussi bien au niveau fondamental (MB) que réacteur (MR). Il sera donc possible de faire correspondre de manière biunivoque les conditions spécifiques de chacun de ces postes.

A terme, le travail devrait donc contribuer à définir les parcours optimaux : nature, variabilité et propriétés thermo-chimiques de la biomasse ; nature et éventuelle flexibilité du procédé de pyrolyse-gazéification ; utilisation finale considérée.



Objectif : L'objectif de ce projet est l'étude, le contrôle et la réalisation d'un procédé de fabrication de couches minces de silicium utilisant l'énergie solaire concentrée.

Participants : E. BECHE⁽¹⁾, R. BERJOAN⁽¹⁾, G. PERAUDEAU⁽¹⁾, F. TEIXEIRA⁽¹⁾, D. COT⁽²⁾, J. DURAND⁽²⁾ et A. VAN DER LEE⁽²⁾

(⁽¹⁾IMP CNRS Odeillo UPR 8521 - (⁽²⁾IEM CNRS Montpellier UMR 5635).

Élaboration de couches minces de silicium : Réacteurs solaires

Deux réacteurs solaires basse pression (10^{-6} torr) ont été successivement conçus et réalisés pour la fabrication par un procédé PVD de couches minces a-Si par évaporation de la surface de la base d'un cylindre de silicium dont une partie est fondue au foyer d'un four solaire de 2 kW. Le premier réacteur a permis de montrer la faisabilité de ces couches minces, le second a été réalisé pour améliorer les performances au point de vue du rendement, d'une part, et pour obtenir un meilleur contrôle des paramètres expérimentaux, tels que la température du silicium exposé au rayonnement solaire concentré. Ce problème concerne l'ensemble des procédés haute température basés sur l'utilisation des fours solaires.

Concernant les mesures de température effectuées plus spécialement sur du silicium, au voisinage de la transition solide-liquide, des mesures expérimentales des émissivités très différentes du liquide et du solide ont dû être effectuées. Ceci a permis de modéliser le comportement thermique du cylindre de silicium. Dans ces conditions expérimentales, on a montré que le silicium liquide peut atteindre une température de 1900K grâce à l'utilisation du logiciel Fluent. La température du liquide a aussi été déterminée en fonction du flux solaire incident. Une modélisation par utilisation de Matlab est en cours ; elle concerne le comportement thermique, dans le temps, du cylindre de silicium.

L'influence d'autres paramètres expérimentaux tels que la distance entre la cible à évaporer (base supérieure du cylindre) et le substrat est examinée. Cette distance régit, selon notre modélisation, la distribution radiale en épaisseur du dépôt : plus cette distance est grande, plus le dépôt doit être homogène en épaisseur.

Caractérisation des couches minces de a-Si

Nous obtenons des couches minces amorphes de silicium contenant de l'oxygène (dépôts de type SiO_x avec $x \sim 0,05$). Les épaisseurs peuvent atteindre 150 nm pour un temps de dépôt de 10 minutes. Ces dépôts sont caractérisés par XPS, Microscopie Électronique à effet de champs et par Ellipsométrie. Des difficultés sont rencontrées en ce qui concerne les mesures de profils radiaux en épaisseur. Une série de dépôts, déposés sur du silicium mono-cristallin, est en cours de préparation afin d'améliorer les mesures expérimentales des épaisseurs des couches en fonction des divers paramètres expérimentaux.

Objectifs actuels ou à long terme

Outre la continuation des activités concernant l'élaboration et la caractérisation de couches minces a-Si, nous avons conçu un nouveau dispositif permettant le chauffage entre 400 et 800°C du substrat dans le réacteur solaire, avec utilisation des substrats en silice. Ce nouveau dispositif, en cours de réalisation, devrait permettre l'obtention de couches poly-cristallines. A plus long terme, on peut envisager la réalisation de couches minces à propriétés photovoltaïques.



L'objectif de ce projet est d'analyser les dispositifs de promotion des énergies renouvelables dans un contexte de libéralisation des marchés électriques, et en particulier les instruments qui associent les quotas imposés aux fournisseurs et les échanges de certificats verts.

Plusieurs types d'instruments sont classiquement utilisés qui relèvent soit des approches par les prix avec les systèmes de prix d'achat garantis (France, Allemagne, Espagne), soit des approches par les quantités avec les systèmes d'enchères concurrentielles (NFFO en Grande Bretagne, Eole 2005 en France avant 2000) ou plus récemment les systèmes de quotas associés aux certificats verts (Grande Bretagne, Italie). Ces deux approches (prix / quantités) présentent des performances radicalement différentes en termes de perspectives de rentabilité, de risque et de coûts de transaction. Les tarifs d'achat ont entraîné un développement très soutenu de la filière éolienne en raison des bonnes perspectives de rentabilité des investissements offertes par des niveaux de prix d'achat relativement élevés alors qu'à l'inverse les niveaux de prix sensiblement plus bas obtenus par les systèmes d'enchères ont logiquement conduit à des capacités installées très inférieures. Les systèmes de prix sont toutefois contestés du fait de l'impossibilité de contrôler les quantités et donc le volume de subventions publiques alloué aux producteurs.

La capacité à stimuler le changement technique, essentielle dans une perspective d'efficacité dynamique, diffère également selon les instruments utilisés : les enchères présentent l'avantage théorique de la pression concurrentielle qui contraint les producteurs à adopter les technologies les plus performantes, mais les marges réduites limitent les capacités d'investissement dans la R&D ; de leur côté, les systèmes de prix garantis autorisent les constructeurs à investir plus massivement dans la R&D et à tirer parti des effets d'apprentissage associés à la diffusion, mais n'incitent pas à innover dans les mêmes proportions que les enchères.

Ce débat doit s'inscrire dans un cadre évolutif qui tient compte de la libéralisation des marchés électriques et des risques de distorsion de concurrence que peuvent créer l'obligation d'achat et les surcoûts associés imposés aux entreprises électriques. Dans ce contexte de marché libéralisé, la possibilité de contourner l'obligation d'achat avec des instruments qui conservent l'avantage des approches par les quantités (quotas) complétée de la flexibilité et de l'incitation à innover apportée par les mécanismes d'échanges (certificats verts) intéressent un nombre croissant de pays. Ces dispositifs présentent par ailleurs une efficacité allocative qui permettrait s'ils étaient adoptés à l'échelle européenne de limiter les coûts de réalisation des objectifs définis par la Directive européenne sur les énergies renouvelables.

L'efficacité de ce dispositif soulève néanmoins un certain nombre de questions qui seront examinées au cours de ce projet : un marché de certificats verts ne montrerait vraiment son intérêt qu'à l'échelle communautaire, ce qui supposerait, outre la définition de règles et modalités de fonctionnement communes, une harmonisation entre les mécanismes d'aide. De plus, la valorisation de la production d'électricité renouvelable sur le marché de gros de l'électricité soulève de nouvelles difficultés liées à son caractère intermittent et aux pénalités qu'imposent les règles de fonctionnement des marchés électriques. Enfin, les risques de volatilité des prix sur le marché des certificats verts conduisent à s'interroger sur le caractère incitatif du dispositif et sur sa capacité à stimuler une dynamique de croissance sur le long terme.