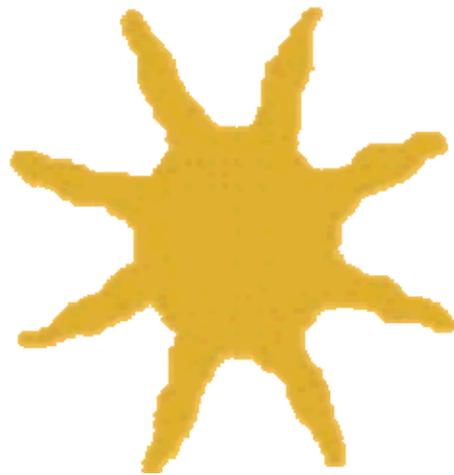


Perpignan 11, 12 et 13 décembre 2002

Programme interdisciplinaire du CNRS

Colloque du Programme Énergie



GAT et PRI

SOMMAIRE

Planning	p.1
Salles de réunion GAT et inter-GAT :	p.3
Exposé, B. Spinner	p.4

Présentation des GAT et PRI :

Thème 1 : Biomasse

GAT 1a	M. Goma	*
PRI 1.1	M. Goma	*

Thème 2 : Photovoltaïque

GAT 2	M. Muller	p.5
PRI 2.1	M. Marfaing	p.6

Thème 3 : Piles à combustibles

GAT 3	M. Lamy	p.8
PRI 3.1	M. Lamy	p.9

Thème 4 : Production et stockage d'hydrogène

GAT 4	Mme Percheron	p.11
PRI 4.1	M. Legrand	p.12
PRI 4.2	Mme Percheron	*

Thème 5 : Gestion de l'électricité

GAT 5	M. Sabonnadière	*
PRI 5.1	M. Hadj Said	*
PRI 5.2	M. Sanchez	p.15

* *Résumé non parvenu.*

Thème 6 : Habitat

GAT 6	M. Penot	*
PRI 6.1	M. Stitou	p.16
PRI 6.2	M. Ménezo	p.19

Thème 7 : Solaire thermique

GAT 7	M. Ferrière	p.21
PRI 7.1	M. Flamant	*

Thème 8 : Thermique

GAT 8	M. Lebouché	*
PRI 8.1	M. Neveu	p.22
PRI 8.2	Mme Lallemand	p.26

Thème 9 : Gestion du froid et de la chaleur

GAT 9	M. Lallemand	p.28
PRI 9.1	M. Lallemand	p.29
PRI 9.2	Mme Mazet	p.31

Thème 10 : Combustion et capture du CO2

GAT 10	M. Most	*
PRI 10.1	M. Tondeur	p.32

Thème 11 : Le nucléaire du futur

GAT 11a	M. Loiseaux	p.34
GAT 11d	M. Pesme	*

Thème 12 : Socio-économie

GAT 12	M. Baumstark	*
--------	--------------	---

PLANNING



Mercredi 11 décembre

Séances présidées par J.B. SAULNIER	10h	Accueil au Palais des Congrès de Perpignan
	11h	Exposé de J.B. Saulnier, Directeur adjoint, SPI
	11h40	Exposé de B. Spinner, Directeur du Programme
	13h	<i>Déjeuner</i>
	14h	Thème 5 : Gestion de l'électricité <ul style="list-style-type: none">• GAT 5 : Réseaux et stockage de l'électricité - M. Sabonnadière• PRI 5.1 : Etude des transferts d'énergie dans les réseaux - M. Hadj Said• PRI 5.2 : Electronique de puissance<ul style="list-style-type: none">- M. Sanchez (Intégration des systèmes de puissance)- M. Ladoux (Architecture de convertisseurs multi-canaux)
	15h30	Thème 1 : Biomasse <ul style="list-style-type: none">• GAT 1 : Biomasse pour l'énergie - M. Goma• PRI 1.1 : Biocarburant éthanol - M. Goma
	16h30	<i>Pause</i>
	16h50	Thème 2 : photovoltaïque <ul style="list-style-type: none">• GAT 2 : Cellules photovoltaïques du futur - M. Muller• PRI 2.1 : Recherches de base en photovoltaïque - M. Marfaing
	17h50	Thème 3 : Piles à combustible <ul style="list-style-type: none">• GAT 3 : PACo et leur gestion - M. Lamy• PRI 3.1 : Cœur de piles à combustible à électrolyte membrane - M. Lamy

Jeudi 12 décembre

Séances présidées par E. FABRE	8h30	Thème 6 : Habitat <ul style="list-style-type: none">• GAT 6 : Apport des énergies renouvelables et maîtrise des échanges dans l'habitat - M. Penot• PRI 6.1 : Froid solaire - M. Stitou• PRI 6.2 : Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques thermiques au bâti - M. Ménezo
	10h	<i>Pause</i>
	10h20	Thème 7 : Solaire thermique <ul style="list-style-type: none">• GAT 7 : Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration - M. Ferrière• PRI 7.1 : Production d'hydrogène par énergie solaire «Hysol» - M. Flamant
	11h20	Thème 8 : Thermique <ul style="list-style-type: none">• GAT 8 : Optimisation des échanges dans les procédés industriels - M. Lebouché• PRI 8.1 : Communauté d'Analyse et de Recherche des Nouvelles Orientations de la Thermodynamique (Carnot) - M. Neveu• PRI 8.2 : Microéchangeurs - Mme Lallemand
	13h	<i>Déjeuner</i>
Séances présidées par D. FINON	14h	Thème 4 : Production et stockage d'hydrogène <ul style="list-style-type: none">• GAT 4 : Production et stockage d'hydrogène - Mme Percheron-Guégan• PRI 4.1 : Production d'hydrogène par des énergie renouvelables - M. Legrand• PRI 4.2 : Matériaux pour le stockage de l'hydrogène - Mme Gicquel
	15h30	Thème 9 : Gestion du froid et de la chaleur <ul style="list-style-type: none">• GAT 9 : Production, stockage et transport du froid et de la chaleur - M. Lallemand• PRI 9.1 : Réseaux de distribution de froid - M. Lallemand• PRI 9.2 : Cycles thermochimiques transport chaleur et froid - Mme Mazet
	16h50	<i>Pause</i>
	17h10	Thème 10 : Combustion et capture de CO₂ <ul style="list-style-type: none">• GAT 10 : Combustion et capture de CO₂ - M. Most• PRI 10.1 : Capture par adsorption de CO₂ dans des gaz de centrales thermiques et leur injection en puits de pétrole - M. Tondeur
	18h10	Thème 11 : Nucléaire du futur <ul style="list-style-type: none">• GAT 11a : Nucléaire du futur - M. Loiseaux• GAT 11b : Fusion thermonucléaire contrôlée - M. Pesme

19h10 **Thème 12 : Socio-économie**

- **GAT 12** : Perspectives socio-économiques dans le secteur de l'énergie - M. Baumstarck

20h *Dîner de Gala***Vendredi 13 décembre****8h30** Réunion des GAT (voir répartition des salles ci-dessous)**10h** *Pause***10h20** Réunion inter-GAT (voir répartition des salles ci-dessous)**12h** Conclusions : Retour des rapporteurs des réunions de GAT et inter-GAT**13h** *Déjeuner***14h30** Départ pour l'aéroport

Planning des salles de réunion du vendredi 13 décembre

	<i>Réunion des GAT (8h30)</i>		<i>Réunion inter-GAT (10h20)</i>	
	<i>Salles</i>	<i>GAT</i>	<i>Salles</i>	<i>GAT</i>
Niveau 1 :	11a	1	12	1, 4, 7, 8
	11b	2	20	2, 5, 6, 12
	11c	3	21	3, 4, 7, 8, 9, 12
	12	4	34	6, 7, 8, 9, 12
Niveau 2 :	20	5	35	8, 9, 10, 12
	21	6	36	8, 9, 11
Niveau 3 :	34	7		
	35	8		
	36	9		
Niveau 4 :	40	10		
Niveau 1 :	JC. Rolland	11 et 12		



EXPOSE LIMINAIRE
Bernard SPINNER
Directeur du Programme

La vraie crise :

LA CRISE EXERGETIQUE

La volonté humaine d'accroître l'espérance de vie de tous les hommes, croissance couplée à la disponibilité de l'énergie pour chacun, peut conduire à une explosion de la consommation énergétique, avec ses conséquences aux niveaux environnement et développement non durable.

Les ressources énergétiques, toutes d'origine solaire avec des temps de séjour longs (les fossiles), ou courts (énergies « renouvelables »), sont suffisantes si toutefois on sait les exploiter, les convertir ou transformer, puis les stocker et transporter en vue de leur utilisation finale pertinente, minimisant les atteintes à l'environnement dans le cadre des règles du développement durable.

L'analyse exergetique, basée sur le deuxième principe de la thermodynamique, est un *instrument unificateur* des méthodes d'optimisation des procédés aux niveaux de la consommation énergétique, des pertes et rejets dans l'environnement, de la recyclabilité des produits de la consommation (à effectuer uniquement par des énergies renouvelables), enfin des analyses économiques.

L'exergie est en effet la mesure réelle des potentiels en qualité et quantité : il s'agit de savoir exploiter au mieux, avec le minimum de pertes, les exergies de ces ressources, selon les besoins exergetiques réels des demandeurs, quelles que soient les formes énergétiques mises en œuvre. Les critères d'efficacités exergetiques incluent ceux de coût de l'exergie et de cycles de vie exergetique.

Un tel instrument doit être pris en compte dans les analyses et recherches des 12 thèmes du programme interdisciplinaire : c'est bien la *crise exergetique* qu'il s'agit de résoudre.



GAT 2 Cellules photovoltaïques du futur

Coordonnateur : Jean-Claude Muller

Le photovoltaïque est un secteur des énergies renouvelables (EnR) en plein essor avec 40% de croissance du marché par an et un doublement de la production tous les 2 ans (400 MWc en 2001).

Etat de l'art : Pour les cellules à base de plaquettes en silicium cristallin (85 % du marché mondial) et dont les rendements industriels atteignent les 16 % sur de grandes surfaces, l'avenir passe par une réduction drastique des coûts. Pour les cellules en couches minces (dont le Si amorphe représente 10 % du marché avec des rendements de 6-8 %), l'objectif majeur reste l'augmentation des rendements de conversion sur le silicium (amorphe, polymorphe, micro- et poly-cristallin) ainsi que sur les matériaux composés (CIGS, CdTe,...). Pour les cellules du futur à semi-conducteurs organiques (3% en début de vie) ou à base de matériaux nano-structurés une recherche fondamentale de base est encore nécessaire. Enfin dans le domaine des composants et de l'architecture des systèmes générateurs, l'enjeu majeur est l'intégration au réseau (y compris de systèmes hybrides de toutes tailles) ainsi que l'intégration de la conversion en puissance à l'échelle du module et de la cellule.

Les différents programmes nationaux (ADEME-CNRS-CEA en partenariat avec l'industrie) et européens ont permis de maintenir notre recherche au niveau mondial. Les réflexions en cours avec les industriels du domaine nous conduisent à proposer pour chaque échéance (court, moyen et long terme), les objectifs prioritaires suivants :

Court terme (< 5 ans) : rendre moins chères et plus efficaces les technologies existantes

- **Silicium cristallin massif** : enjeux → rendements cellules de 18-20% (15x15 cm), coûts modules <1 €/W

Un des verrous de cette filière, principalement basée sur le silicium multicristallin (mc-Si), est lié au coût très élevé de la matière première. Nous proposons d'étudier en collaboration avec PHOTOWATT et EMIX :

- nouvelles méthodes de purification du Si métallurgique par des techniques plasma ;
- nouveaux procédés : plaques minces <150 µm ou rubans de 30-150 µm, substrats de type n ;
- sciage innovant (électro-chimique) : diminution des pertes de coupe et des contraintes.
- **Nouveaux systèmes multi-sources** : enjeu → intégration aux réseaux électriques
 - gestion intelligente de systèmes hybrides et développement du concept de modularité sécurisé.

Moyen terme (5-15 ans) : développement industriel de la filière cellules en couches minces

Mise au point de procédés à haut débit / grande surface et obtention de modules de rendements de 12-15 %.

- **Silicium cristallin en couches minces**: enjeu → maîtriser la cristallisation et le report de couches
 - cristallogénèse de gros grains → cristallisations induites par métaux ou en phase liquide ;
 - élaboration de quasi-monocristaux de Si / transfert de silicium cristallin.
- **Silicium amorphe ou faiblement cristallisé** : enjeu → transfert vers l'industrie et nouvelles structures

Transfert du Si polymorphe aux industriels (FEE, SOLEMS et UNAXIS) et intégration de ces couches dans de nouvelles structures du type :

- tandem Si/SiGe et Si/µSi ;
- hétéro-structures pour les matériaux massifs, rubans ou films minces.

- **Matériaux composés à base de chalcogénures : enjeu → maîtrise du matériau, interfaces et dopage**
 - composés CIGS par électrochimie et co-évaporation (exploration de nouveaux matériaux) ;
 - développement de modules (30 x 30cm) avec les industriels (EDF et St GOBAIN).

Les meilleurs atouts de ces 2 dernières filières à basse température seront les fortes synergies induites par les nombreux points communs (substrat de verre, couche conductrice transparente ITO, gravure,...).

- **Composants de puissance** : nouveaux concepts pour la connexion des cellules tandem.

Long terme (> 15 ans) : Potentialités de nouveaux matériaux et concepts de cellules innovantes

Etudes exploratoires de nouveaux matériaux. Enjeux → très faibles coûts et/ou très hauts rendements.

- **Matériaux organiques** :
 - Les verrous : la stabilité dans le temps et sous éclairnement → études très fondamentales sur :
 - identification des matériaux : co-polymères, nouvelles molécules, dérivés des fullerènes, pigments ;
 - couches actives : réseaux interpénétrés, films de Langmuir-Blodgett, cristaux liquides ;
 - dispositifs : rôle des interfaces.
- **Nouvelles structures tandem : enjeu → conversion par luminescence et multi-photons**
 - matériaux composites : matrice hôte modifiée par l'incorporation de nanocristallites ;
 - nanocristallites en Si et Ge, nanoparticules ; (matrices et espèces soit minérales soit organiques).
- **Composants de puissance** : intégration de la conversion en puissance à l'échelle de la cellule.



PRI 2.1

Recherches de base en photovoltaïque : nouveaux matériaux

Coordonnateur : Yves Marfaing

Le matériau dominant de l'industrie des cellules solaires photovoltaïques est le silicium cristallin massif issu de lingots découpés en plaquettes. Pour l'avenir, un développement à grande échelle passe par l'utilisation de couches minces. Il s'agit de réduire le volume de matière, de faire appel à des procédés de préparation simples, adaptés à de grandes surfaces, tout en maintenant des rendements de conversion comparables à ceux des cellules actuelles. Plusieurs types de matériaux sont envisagés pour atteindre ces objectifs : d'une part, différentes formes du silicium, amorphe, microcristalline et polycristalline ; d'autre part des composés polycristallins du type CIS (CuInSe_2) ; enfin, des molécules et polymères organiques. Les deux dernières classes de matériaux sont les plus novatrices et justifient des efforts de recherche concertés et pluridisciplinaires : tel est l'objet de ce PRI.

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

Ce sont actuellement les dispositifs en couches minces les plus performants. La structure en est cependant 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 au laboratoire IREM de l'Université de Versailles (1) utilisant les analyses chimiques par spectroscopie XPS à haute résolution.

Les principaux aspects abordés sont :

- la détermination précise de la composition chimique de surface de Cu(In,Ga)Se_2 ;
- l'influence des différents traitements chimiques utilisables dans la procédure de fabrication des structures ;

- l'évaluation des effets de dispersion des états de surface initiaux dus au vieillissement des surfaces en contact avec l'air ;
- la réalisation des profils de composition à travers l'interface CdS/CIGS.

Deux autres équipes, non financées par ce PRI, apportent des informations complémentaires sur les propriétés des surfaces et les caractéristiques photovoltaïques :

- le LECA de l'ENSCP (2) qui prépare les structures, effectue des mesures du photo-potential de surface par sonde Kelvin et de la tension développée sur les dispositifs terminés ;
- le LGEP (3) qui effectue la spectroscopie des états électroniques associés aux interfaces par mesures d'admittance.

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'autoriser, de manière reproductible, des rendements de conversion autour de 15 %.

2 - Cellules en composés organiques

Ces dispositifs sont encore au stade des études exploratoires, prélude à la définition de bonnes structures de conversion. Il s'agit de combiner plusieurs phases organiques assurant les fonction 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-excitables et l'accepteur C_{60} . Ils sont au programme de l'IPCMS (4).

Après la synthèse d'oligophénylène-éthynylènes (OPE), 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.

Les résultats actuels ont montré l'influence cruciale de la morphologie et de l'épaisseur du film mince composite. Afin de déterminer de manière plus rationnelle l'effet de ces paramètres, une étude est consacrée à la préparation des films minces 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

En parallèle, une analyse systématique des propriétés électrochimiques des nouveaux produits est conduite au Laboratoire d'Électrochimie et de Chimie physique de Strasbourg (7) (hors financement PRI) pour déterminer les paramètres énergétiques intervenant dans l'effet photovoltaïque.

Une autre voie pour tirer parti des propriétés spécifiques du C_{60} est mise en œuvre à au POMA d'Angers (5). Elle consiste à associer C_{60} à des polymères donneurs d'électrons dans des réseaux interpénétrés. Cette configuration particulière augmente, pour une même surface apparente, la probabilité de photoexcitation à l'interface entre les deux phases. Le polymère type est le poly-phénylène vinylène (PPV) mais d'autres produits sont à rechercher. Les propriétés de transport de ces corps organiques sont étudiés par méthode de temps de vol et dans des dispositifs à effet de champ. Par ailleurs une spectroscopie des états d'interface est effectuée au LGEP (3), au moyen des techniques d'admittance que ce groupe applique aussi aux composés polycristallins. Enfin, l'ERT "Cellules plastiques" du POMA met ses moyens techniques à contribution pour réaliser des diodes stables à partir des systèmes organiques mis au point dans les différents groupes impliqués dans ce PRI (Angers, Strasbourg, Toulouse).

Les cellules photovoltaïques à base de cristaux liquides colonnaires constituent le projet du LGET (6) en collaboration avec l'équipe de synthèse organique du CRPP (8) (non financée par ce PRI).. Cette disposition en colonnes, représentée par un empilement régulier de systèmes aromatiques voisins, permet d'envisager des structures dotées de bonnes propriétés de transport dans le sens vertical. Deux types de matériaux sont nécessaires, l'un donneur d'électrons, assurant aussi le transport des trous, l'autre accepteur et conducteur d'électrons. Les cristaux liquides à base de triphénylènes sont des transporteurs de trous déjà connus. Une nouvelle classe de phthalocyanines substituées à phase colonnaire a été découverte, qui permet aussi le transport des trous. Pour le transport des électrons, les molécules proposées sont des benzopérylènes et des esters de triphénylène, pyrène et pérylène. Ces produits font l'objet d'études systématiques relatives à leur caractéristiques optiques, à la transformation ordre/désordre et au mouillage du substrat. Les propriétés de transport électrique sont déterminées par technique du temps de vol. Plusieurs dispositifs photovoltaïques seront réalisés et analysés avec la configuration colonnaire orientée recherchée.

3 - Laboratoires impliqués

Composés polycristallins

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

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

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

Composés organiques

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

(5) POMA, Angers : J.M. Nunzi, S. Dabos, B. Sahraoui

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

Collaborations avec : (7) LEPCS, Strasbourg : M. Gross, J.P. Gisselbrecht

(8) CRPP, Pessac : H. Bock, Nguyen Huu Tinh, P. Barois



GAT 3 Piles à Combustible et leur Gestion (PACoGES)

Coordonnateur : Claude Lamy

Le Groupe d'Analyse Thématique "Piles à Combustible et leur Gestion" (PACoGES) se propose de coordonner les réflexions et les activités de l'ensemble des acteurs concernés par des recherches et développements sur les piles à électrolyte membrane (PEMFC fonctionnant à basse température) et les piles à oxydes solides (SOFC fonctionnant à haute température). Cela concerne environ 200 chercheurs répartis dans une cinquantaine de Laboratoires, dont 40 du CNRS (3 en STIC, 8 en SPI, 25 en SC, 4 en SPM), 5 Equipes du CEA, 1 de EDF, 1 de GDF, 2 de l'INRETS (avec le CNRT de Belfort), 1 du CNAM, 1 de ARMINES et plusieurs Equipes Industrielles.

Pour les 2 types de piles retenues, il a été identifié un certain nombre de verrous :

le catalyseur nécessaire pour l'activation des réactions électrochimiques d'oxydation du combustible (hydrogène issu du reformage, méthanol, éthanol, hydrocarbures avec reformage interne) et de réduction de l'oxygène : quantité de platine importante (1 à 2 g par kW pour les PEMFC), nouveaux catalyseurs à base d'oxydes à conduction mixte (SOFC) ;

les électrolytes : épaisseur de 10 à 200 μm , difficiles à fabriquer (coût élevé), remplacement des membranes perfluorées (PEMFC), meilleure connaissance de la zircone yttrée et des céramiques de terres rares (cérine) et recherches de nouveaux électrolytes solides (SOFC). Vieillesse et dégradation (baisse des performances en fonction du temps) ;

les électrodes : recherche de nouveaux matériaux d'électrodes (anodes et cathodes) pour permettre un fonctionnement à 700 °C et abaisser les surtensions ;

les technologies de montage : conductibilité électrique à assurer, architecture d'assemblage, corrosion en milieu oxydant ou réducteur à haute température des matériaux d'interconnexion (plaques bipolaires), fragilisation mécanique, étanchéité des assemblages, mise en forme des composants (couches minces et épaisses) ;

le combustible H_2 : modes de production, stockage et déstockage dynamique ; pureté vis à vis de CO , CO_2 (basse température) ; gaz naturel (haute température) ; choix parmi d'autres filières de combustibles (hydrocarbures, gaz naturel, alcools, bioéthanol, ...)

la gestion de la chaleur et de l'eau dans les piles à basse température : extraction dynamique de la chaleur dans le domaine des transports, problématiques particulières des piles miniatures pour les portables ;

la gestion de la chaleur dans les systèmes intégrés (cogénération, ...)

les périphériques : processeurs de combustible, convertisseurs électriques, échangeurs de chaleur, compresseurs, pompes de circulation ;

l'intégration du système (poids/volume) selon l'application envisagée ;

les matériaux : coût, disponibilité, durée de vie, recyclabilité.

Les premières réflexions du GAT ont conduit à identifier 3 actions prioritaires :

- * Cœurs de piles à haute température (SOFC et ITSOFC) - Réunion du 28/09/2002 ;
- * Cœurs de piles à basse température (PEMFC et DMFC) - Réunion du 31/10/2002 ;
- * Gestions thermique et fluïdique des systèmes PAC - Réunion du 28/11/2002.



PRI 3.1 Cœurs de Piles A Combustible à Electrolyte Membrane (Co-PACEM)

Coordonnateur : Claude Lamy

Les recherches proposées dans le PRI "Co-PACEM" visent à améliorer le fonctionnement du cœur d'une pile à électrolyte membrane (PEMFC), 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 de la membrane tout en améliorant ses propriétés (conductivité, stabilité mécanique et thermique, faible perméabilité à un alcool) et en diminuant son coût, et d'optimiser le transport des réactifs et de la chaleur au niveau des assemblages membrane-électrodes (EME). Cela nécessite la résolution de 3 verrous scientifiques :

- * l'amélioration des catalyseurs des réactions électrochimiques aux électrodes ;
- * la synthèse et la caractérisation de nouvelles membranes protoniques ;
- * les phénomènes de transfert et de transport, et la gestion des fluides au sein des cœurs de pile.

1. Catalyseurs des réactions aux électrodes

L'un des problèmes essentiels des piles à combustible fonctionnant à basse température (20 à 80°C) est la faible réactivité électrochimique des combustibles (autres que l'hydrogène de haute pureté) et du comburant, l'oxygène. Cela se traduit par des vitesses de réaction faibles (c'est-à-dire des densités de courant faibles) qui ne peuvent être augmentées que par l'action simultanée de l'application d'un potentiel d'électrode éloigné du potentiel d'équilibre (surtension élevée) et de la présence d'un catalyseur (électrocatalyse). Par ailleurs, l'augmentation de la température de fonctionnement de 80 à 150°C permettrait d'accroître fortement (facteur 100 à 1000) la vitesse des réactions électrochimiques (activation thermique), c'est-à-dire la f.é.m. de la pile. A basse température, les surtensions d'oxydation du combustible alcool et de réduction de l'oxygène sont de l'ordre chacune de 0,3 à 0,4 V, ce qui ramène la tension aux bornes de la cellule à 0,4-0,6 V au lieu de 1,2 V théorique.

La recherche de catalyseurs plus actifs pour l'oxydation des alcools (et aussi de l'hydrogène issu des gaz de reformage et contenant des traces de monoxyde de carbone, agissant comme un poison des

catalyseurs à base de platine) et pour la réduction de l'oxygène est donc un point important du développement des PEMFCs.

2. Electrolytes conducteurs protoniques en films minces (membranes)

L'électrolyte solide polymère, conducteur protonique, joue un rôle clé dans les PEMFCs, car il doit assurer le passage du courant électrique à l'intérieur de la pile grâce à sa conductivité ionique (tout en bloquant le passage des électrons qui doivent circuler dans le circuit extérieur pour y produire l'énergie électrique correspondant à la combustion du combustible dans l'oxygène) et il doit être parfaitement étanche aux réactifs (combustible d'un côté, oxygène de l'autre). De plus, la membrane protonique doit être stable mécaniquement, chimiquement et thermiquement (au moins jusqu'à 150°C), et sa durée de vie doit être suffisante.

Les PEMFCs actuelles utilisent des membranes de type Nafion[®], qui remplissent partiellement ces fonctions, car leur stabilité thermique est limitée autour de 100°C, et leur conductivité protonique diminue fortement au-delà de 100°C, par suite de leur déshydratation. Par ailleurs, elles ne sont pas étanches aux combustibles liquides tels que les alcools. Ce problème est d'autant plus important que la membrane est fine, ce qui est le cas pour les coeurs de piles miniatures, dans lesquels l'épaisseur des membranes est de l'ordre de quelques dizaines de μm . De plus, leur coût actuel (de l'ordre de 500 Euros/m²) est prohibitif.

La mise au point de nouvelles membranes de perméabilité aux alcools beaucoup plus faible (d'un facteur 10 au moins par rapport au Nafion[®]) et stables thermiquement jusqu'à 150°C, permettrait de développer des piles à alcool fonctionnant jusqu'à 150°C. Dans le cas des piles de puissance, l'élévation de température est un point essentiel pour augmenter fortement la vitesse (c'est-à-dire les densités de courant) des réactions électrochimiques avec les catalyseurs à base de platine connus actuellement. Dans le cas des piles miniatures, des techniques de dépôt de membrane et de catalyseurs en couches minces doivent être mises au point. Par ailleurs la conductivité ionique σ_i de ces membranes devrait être égale, sinon supérieure à celle du Nafion[®] ($\sigma_i \geq 5 \cdot 10^{-2} \text{ S/cm}$) pour limiter leur résistance spécifique à quelques 0,1 $\Omega \text{ cm}^2$.

3. Phénomènes de transfert et de transport. Gestion des fluides au sein du cœur de pile

La modélisation du fonctionnement des électrodes poreuses, l'étude de l'écoulement des réactifs dans les plaques bipolaires, les conditions de transport des réactifs vers les sites catalytiques, l'évacuation des produits de réaction, l'évacuation de la chaleur, et la gestion thermique du cœur de pile, seront abordés dans le cadre des travaux de ce PRI.

Afin de valider les nouveaux catalyseurs et les nouvelles membranes développées, les caractéristiques électriques, tension de cellule $E(j)$, puissance spécifique $P(j)$, en fonction de la densité de courant j , seront déterminées. Pour cela, des assemblages électrode-membrane-électrode (EME) pourront être réalisés selon plusieurs techniques (pressage à chaud, collage à froid, dépôt en couches minces,...) et selon la nature des membranes utilisées et l'architecture de la pile à combustible envisagée.

Pour mener à bien ces recherches le PRI "CoPACEM" associe les compétences de plusieurs Equipes du CNRS (départements SPI, SPM et SC), de plusieurs Equipes du CEA (à Grenoble et au Ripault) et d'une PMI, la SORAPEC, spécialiste français de la fabrication des EME de PEMFC et de petits "stacks" (quelques centaines de W à quelques kW).

Les Equipes de catalyse, sous la coordination du Laboratoire de Catalyse en Chimie Organique de Poitiers (LACCO, UMR6503), développeront de nouveaux catalyseurs bimétalliques et trimétalliques pour l'anode (permettant une tolérance au CO jusqu'à 2000 ppm dans le cas de H₂ issu du reformage, ou permettant d'augmenter fortement la vitesse d'oxydation du méthanol ou de l'éthanol) et pour la cathode (réduction de l'oxygène, éventuellement en présence d'alcools) par de nouvelles méthodes de synthèse : voies colloïdale, radiolytique, électrochimique, pulvérisation plasma.

Les Equipes "Membranes", sous la coordination de l'Institut Européen des Membranes de Montpellier (IEMM, UMR5635), rechercheront et caractériseront de nouvelles membranes (synthèse de polymères fluorés analogues au "Nafion" mais en série aromatique, de polymères dérivés des polyétheréthercétones, membranes composites organiques-inorganiques) ayant les propriétés requises selon les applications visées : conductivité $\sigma > 10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$, tenue en température jusqu'à 150°C, durée de vie > 2000 heures, perméabilité au méthanol $< 5 \cdot 10^{-6} \text{ mol/min/cm}^2$.

Enfin les Equipes "Thermique et Fluidique", sous la coordination du Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée de Nancy (LEMETA, UMR7563), mèneront des recherches sur la détermination expérimentale et la modélisation des phénomènes au niveau du cœur de pile (transport et transfert de matière, de chaleur, de charge, gestion de l'eau) d'une part, et sur la réalisation d'assemblages électrode - membrane - électrode par différentes techniques (pressage à chaud, dépôts sous vide tels que PVD, CVD, PECVD) d'autre part.



GAT 4 Production et stockage de l'hydrogène

Coordonnateur : Annick PERCHERON-GUEGAN

Le projet de GAT Production et Stockage de l'Hydrogène rassemble une vingtaine d'équipes concernées par ces deux aspects de la technologie Hydrogène, les procédés de stockage devant s'adapter aux conditions de production (débit, température, pression, pureté du gaz...). L'hydrogène peut devenir l'un des vecteurs d'énergie majeur dans l'avenir. Les applications de l'hydrogène dans le domaine de l'énergie sont en effet 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. De plus cette technologie se trouvera confrontée lors de son déploiement à des questions socioéconomiques (acceptabilité sociale des innovations envisagées, faisabilité économique...), il est donc paru intéressant d'associer à notre démarche une équipe de sciences sociales.

Production de l'Hydrogène

Enjeux

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

Verrous

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

- 1- à court terme, améliorer et innover sur les technologies existantes (reformage d'hydrocarbures), du fait de la demande pour les applications décentralisées et embarquées de reformeurs de petit débit, compacts, à cinétique performante et à bas coûts à partir de plusieurs combustibles. En effet, l'investissement est prohibitif lorsque la quantité d'hydrogène à produire est peu importante ($< 500 \text{ Nm}^3/\text{h}$), cas des piles à combustible et applications sur site (gamme $0\text{-}300 \text{ Nm}^3/\text{h}$).
- 2- à moyen et long terme, développer de nouvelles solutions et technologies de production d'hydrogène en grandes quantités, centralisées ou en délocalisées et peu polluantes (en terme de GES) .

Stockage de l'hydrogène

Enjeux

Le stockage est l'un des verrous technologiques pour l'utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie. Il doit permettre d'une part un haut degré de sécurité et d'autre part, des facilités d'usage en terme de capacités de stockage et de dynamique de stockage/déstockage pour permettre à différentes applications de fonctionner dans des conditions techniques acceptables. Pour que l'hydrogène devienne une solution viable aux problèmes que les besoins d'énergie posent à l'environnement, les procédés de stockage devront donc être sûrs, économiques et adaptés à une multitude d'utilisation dans le futur : applications automobile, transports publics, transports lourds, deux-roues, outillage etc..

Verrous

Aujourd'hui, plusieurs méthodes de stockage fournissent des potentialités intéressantes mais elle demandent encore de nombreuses recherches avant la réalisation de prototypes réalistes et le développement industriel. Les différents modes présentent chacun leurs avantages et leurs inconvénients selon des critères économiques, énergétiques, capacité massique et volumique de stockage, sécurité et cinétique de stockage/déstockage.

Les deux voies les plus prometteuses pour résoudre ce problème reposent sur la mise au point de systèmes à base de nouveaux matériaux à haute capacité de stockage : hydrures métalliques réversibles dans des conditions de température et de pression voisines des conditions ambiantes et matériaux

carbonés (nanostructurés, charbons activés etc.) pour le stockage de l'hydrogène par adsorption/compression à pression réduite (20 MPa) par rapport au stockage par compression et à température ambiante (> 70 MPa). Les verrous principaux sont l'obtention de ces nouveaux matériaux et systèmes associés de stockage satisfaisant aux critères principaux : capacités volumique et massique et coûts économique et énergétique. Cette obtention passe par la conception, la synthèse et la caractérisation de nouveaux matériaux, la maîtrise de leur production à des coûts raisonnables, une meilleure compréhension des phénomènes physico-chimiques d'interaction hydrogène/matériaux, la maîtrise de la mise en œuvre de ces matériaux dans des réservoirs adaptés et de la dynamique du stockage/déstockage dans ces réservoirs (résolution des problèmes thermiques, notamment).

Dans l'état actuel d'avancement, chacune de ces deux voies a un potentiel de progrès important et peut arriver à satisfaire les spécifications des différentes applications stationnaires et mobiles; aussi est-il nécessaire de poursuivre les développements en parallèle dans ces deux voies au moins pendant quelques années avant de faire un éventuel choix. De plus, si chacune de ces voies satisfait les critères massiques et volumiques, il est probable que chaque voie trouvera ses propres marchés, selon le rapport performances/coût et conditions d'utilisation. Enfin, une nouvelle voie prometteuse à explorer dans le programme concerne les procédés associant production électrolytique (à partir d'eau) directement au stockage de l'hydrogène dans un matériau adsorbant.



PRI 4.1 Production d'hydrogène par des énergies renouvelables

Coordonnateur : Jack LEGRAND

Code de l'unité : UMR-6144

Département scientifique : Sciences Pour l'Ingénieur

Laboratoire GEPEA, CRTT, Bd de l'Université, BP 406, 44602 Saint-Nazaire

Téléphone : 02-40-17-26-30 Télécopie : 02-40-17-26-18 Mél : jack.legrand@gepea.univ-nantes.fr

Autres unités impliquées

❑ UMR CNRS - CEA 163

Laboratoire d'Ecophysiologie de la Photosynthèse - CEA de Cadarache

Responsable scientifique : Gilles PELTIER

Département scientifique : Sciences du Vivant

❑ UMR - 6521

Laboratoire de Chimie, électrochimie moléculaires et chimie analytique, Faculté des Sciences et des Techniques de Brest

Responsable scientifique : Frédéric GLOAGUEN

Département scientifique : Sciences Chimiques

❑ UMR - 8613

Laboratoire de Chimie Inorganique, Institut de Chimie Moléculaire et Matériaux, Université Paris Sud d'Orsay

Responsable scientifique : Aily AUKAULOO

Département scientifique : Sciences Chimiques

Résumé :

L'objectif de ce PRI est d'étudier et de développer les méthodes de production d'hydrogène basées sur des énergies renouvelables et, si possible, sans dégagement parallèle de gaz à effet de serre, afin de mettre en œuvre dans un souci de développement durable des procédés totalement propres.

Dans ce contexte, l'utilisation de l'eau comme source première de l'hydrogène est à privilégier, et les études décrites dans ce PRI se proposent de travailler sur cette base commune. Trois études sont pour cela proposées. La première utilise les capacités naturelles de certains microorganismes à décomposer l'eau et donc produire de l'hydrogène (Etude n°1 : Production d'hydrogène par des microalgues). Les seconde et troisième études sont basées sur des approches biomimétiques, soit en se focalisant sur l'élaboration d'électrocatalyseurs/photocatalyseurs spécifiques et efficaces inspirés de l'analyse structurelle des enzymes hydrogénases naturelles (Etude n°2 : Production d'hydrogène par une approche biomimétique des enzymes hydrogénases), soit en élaborant artificiellement des modèles reproduisant l'action des enzymes hydrogénases dans l'appareil photosynthétique (Etude n°3 : Photoproduction de dioxygène et de dihydrogène par photolyse de l'eau).

Etude n°1 : Production d'hydrogène par des microalgues

❑ Objectif scientifique

L'objectif de cette étude est d'utiliser les capacités photosynthétiques des microalgues afin d'élaborer à terme un procédé de bioproduction d'hydrogène à partir d'énergie solaire et d'eau sans dégagement parallèle de gaz à effet de serre (CO₂) inhérent aux autres organismes hétérotrophes.

❑ Stratégie scientifique

L'approche globale consistera à mener en parallèle les expérimentations au niveau compréhension et amélioration des phénomènes métaboliques entrant en jeu dans la production de biohydrogène, et leur transposition au niveau du procédé de production. L'objectif est d'intégrer les problématiques biologiques et procédés à chacune des étapes du développement du programme. Cela permettra d'optimiser le protocole opératoire final, avec la double approche Ecophysiologie et Génie des Procédés.

L'inconvénient majeur pour l'élaboration d'un procédé rentable basé sur le dégagement biologique d'hydrogène est la nature transitoire du phénomène. Toutefois, les avancées scientifiques récentes ont permis de mieux comprendre les mécanismes métaboliques et bioénergétiques impliqués dans la photoproduction d'hydrogène, et il apparaît ainsi intéressant de proposer des solutions techniques, basées notamment sur la flexibilité métabolique des algues, pour s'affranchir des limitations du processus. Une voie intéressante consiste en l'alternance de phases aérobiques de production de pouvoir réducteur sous forme de réserves carbonées, et phases anaérobiques de production d'hydrogène où les réserves carbonées sont consommées. L'objectif est donc de développer un procédé de production basé sur ce principe, ce qui va nécessiter dans un premier temps de comprendre et améliorer les processus biologiques impliqués, puis de le mettre en œuvre dans un photobioréacteur dédié. Les collaborations entre les équipes concernées par les différents aspects scientifiques est donc une étape importante du développement du sujet, d'où le rapprochement entre l'UMR 6144 (département Sciences Pour l'Ingénieur) et l'UMR CNRS-CEA 163 (département Sciences du Vivant).

Etapes-clés de l'étude

Optimisation métabolique de la bioproduction d'hydrogène (étape pilotée par l'UMR CNRS-CEA 163)

- ⇒ optimisation de la constitution de réserves carbonées durant la phase de photosynthèse aérobique (effet de carences minérales)
- ⇒ optimisation de la production d'H₂ pendant la phase anaérobique (effet d'agents découplants)
- ⇒ caractérisation des voies de réduction non-photochimique des plastoquinones et identification des acteurs moléculaires afin d'accroître les capacités de transfert d'électrons et la production d'hydrogène associée
- ⇒ optimisation du rendement de conversion photosynthétique par la diminution de la taille des antennes collectrices

Mise au point d'un procédé pour la bioproduction d'hydrogène, et validation énergétique (étape pilotée par l'UMR 6144)

- ⇒ conception d'un photobioréacteur de laboratoire adapté à la production biologique d'hydrogène en conditions contrôlées
- ⇒ transposition des recherches effectuées au niveau métabolique sur le procédé d'étude et choix d'un protocole opératoire pertinent pour la mise en œuvre du procédé
- ⇒ estimation des productivités atteintes et du rendement énergétique sur le photobioréacteur pilote
- ⇒ optimisation de chaque étape de la production (évaluation de l'influence des paramètres de culture)
- ⇒ extrapolation à un procédé de production plus important et à énergie solaire

Etude n°2 : Production d'hydrogène par une approche biomimétique des enzymes hydrogénases

❑ Objectif scientifique

Parmi les différents procédés de production d'hydrogène, la décomposition de l'eau par voie électrochimique ou photo-électrochimique permet d'envisager une production locale au sein de petites unités. Cette étude se base sur l'élaboration d'électrocatalyseurs / photo-électrocatalyseurs efficaces et « bon marché » inspirés des enzymes hydrogénases pour la décomposition de l'eau.

❑ Stratégie scientifique

Les centres actifs «clusters H» des enzymes hydrogénases sont des assemblages bimétalliques fer et/ou nickel dont les structures cristallographiques respectives viennent d'être très récemment élucidées. Ceci rend envisageable une approche biomimétique de la production d'hydrogène par décomposition (photo)électrochimique de l'eau. L'approche retenue consistera donc en la synthèse de complexes organométalliques analogues structuraux et/ou fonctionnels du «cluster H». La validation des modèles sera effectuée par une étude systématique de l'activation des protons. Nous chercherons en particulier à déterminer l'influence sur la catalyse des ligands pontant les deux centres métalliques et ceci afin :

1. De générer un site actif au niveau d'un centre métallique ;
2. De favoriser le couplage proton-hydrure ;
3. De permettre un accrochage du motif catalytique sur une électrode.

Étapes-clés de l'étude (étapes pilotées par l'UMR 6521)

- ⇒ Une avancée significative dans la compréhension du mécanisme de fonctionnement du "cluster H" en ce qui concerne l'activation des protons.
- ⇒ L'élaboration et la mise en œuvre à l'échelle du laboratoire d'électrocatalyseurs biomimétiques de la production d'hydrogène par décomposition d'acides protiques en milieux organiques.
- ⇒ Passages de catalyseurs fonctionnant en phase homogène (solution) vers des catalyseurs supportés, plus facile à mettre en œuvre et plus adaptés à une utilisation en milieu aqueux.

Etude n°3 : Photoproduction de dioxygène et de dihydrogène par photolyse de l'eau

❑ Objectif scientifique

Cette approche se propose d'effectuer la biophotolyse de l'eau en faisant appel à des processus biologiques bien établis basés sur la photosynthèse des algues et cyanobactéries qui, sous certaines conditions, sont capables de réduire des protons de l'eau en dihydrogène grâce notamment à des enzymes (hydrogénases). L'idée est d'élaborer des systèmes supramoléculaires en s'inspirant des grands principes offerts par la Nature afin d'oxyder l'eau puis, en une étape physiquement séparée, de réduire les protons dégagés en hydrogène.

❑ Stratégie scientifique

La voie choisie pour la modélisation fonctionnelle des systèmes naturels performant les réactions cibles, c'est à dire l'oxydation de l'eau en dioxygène et la réduction des protons en hydrogène, consiste en l'élaboration de systèmes mixtes ruthénium-manganèse pour la partie oxydante et ruthénium-nickel pour la réduction. Notre objectif est de relier de façon covalente un chromophore photoactif stable à des complexes métalliques capables de réaliser les réactions chimiques mentionnées ci-dessus, ceci par transfert d'électron intramoléculaire induit sous l'action de la lumière. Selon notre stratégie, nous mettons en œuvre la synthèse des espaceurs rigides dans le but de mieux contrôler les distances intermétalliques au sein de nos modèles synthétiques. Condition *sine qua non* pour mieux moduler les propriétés photophysiques du chromophore photoactif.

Nous profitons de notre étroite collaboration avec l'équipe de B. Rutherford au CEA de Saclay, qui travaille activement sur le PSII et les Hydrogénases pour améliorer nos modèles biomimétiques. Le but ultime de notre projet serait de déposer nos complexes synthétiques sur des électrodes pour la réalisation de concert l'oxydation et la réduction de protons.

Étapes-clés de l'étude (étapes pilotées par l'UMR 8613)

- ⇒ mise au point de synthèse de ligands hétéroditopiques capable de relier le site photoactif et le site catalytique.
- ⇒ optimisation de la longueur de l'espaceur entre les deux sites dans le but de minimiser les transferts d'énergie au dépens de transfert d'électron.
- ⇒ élaboration de complexes capables d'oxyder l'eau et de réduire des protons.
- ⇒ études des propriétés photophysiques sur les complexes greffées sur surface et en solution.



PRI 5.2 Electronique de puissance Haute Tension

Coordonnateur : J.L. Sanchez

Réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique Action 2 : Electronique de Puissance Haute Tension

Composants de puissance Haute tension

Une partie de l'action électronique de puissance haute tension du PRI «Réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique» est centrée sur les aspects nouveaux composants interrupteurs. Cette thématique est traitée par plusieurs laboratoires dans le cadre du GDR 2084 «Intégration des Systèmes de Puissance».

Objectif scientifique

Pour évoluer vers des convertisseurs de puissance haute tension et grande puissance, compatibles avec l'action 1 «Etude des transferts d'énergie dans les réseaux», une solution consiste à envisager l'étude et l'optimisation de composants semiconducteurs de puissance haute tension.

La première voie choisie concerne la conception d'interrupteurs en silicium haute tension (5 à 6 kV) et ensuite la conception et la réalisation de modules hybrides qui par des associations série/parallèle de composants élémentaires devront permettre d'atteindre des tensions de 25 kV. Le Silicium peut potentiellement permettre la réalisation de composants de 5 à 6 kV mais il paraît limité à partir de 7 kV. L'association série et parallèle de ces composants élémentaires ouvre la voie à la réalisation de modules de conversion pour le réseau de distribution de l'énergie électrique pour lesquels la tension de service se situe autour de 25 KV. Nous proposons de travailler à la fois sur les problèmes spécifiques des composants Silicium très haute tension, à savoir l'optimisation de l'architecture et de la technologie des protections périphériques des composants mais aussi sur l'intégration dans ces composants, d'organes d'alimentation permettant de prélever aux bornes de puissance du composant, les énergies nécessaires à sa commande. Le pilotage de ces composants, qui nécessite une isolation galvanique élevée, pourrait alors se faire à partir des signaux à faible énergie plus compatibles avec les isolations électriques requises. Des organes de surveillance et contrôle peuvent être aussi envisagés pour faciliter l'association série des composants. La première phase consistera à définir les limites en tension accessibles et les contraintes d'intégration des éléments de contrôles liés à ces dispositifs haute tension.

A partir de ce type de composants une deuxième phase consiste à proposer des modules hybrides basés sur des associations séries parallèles des composants silicium haute tension (5 à 6 kV). On visera à intégrer au sein du module les fonctions d'équilibrage et de protections indispensables aux associations séries. Cette démarche demande la mise au point de technologies d'interconnexions, d'isolation et de montage compatibles avec un bon refroidissement et une bonne maîtrise des composants parasites. Pour ces deux opérations, d'importants moyens expérimentaux viendront compléter le banc de test électrothermique du LEG (cyclage électrothermique et comportement du diélectrique du DBC, essais en commutation sous 3 kV...).

Un deuxième étude, correspondant à une prospective plus long terme , doit être engagée sur des composants commandables forte tension en SiC ou diamant.

Le carbure de silicium a des propriétés physiques intéressantes pour les composants de puissance de forte tension. En effet, il possède un champ électrique critique environ dix fois supérieur à celui du silicium et les épitaxies commerciales permettent d'ores et déjà d'envisager l'obtention de composants ayant des tenues en tension de 10 à 20 kV sans nécessiter de mise en série (il existe déjà des démonstrateurs de type diode). Un gain significatif sur la complexité et la taille des dispositifs statiques résulterait donc de l'existence de tels composants, d'autant plus qu'ils peuvent également permettre un fonctionnement à plus haute fréquence, à plus haute température et engendrer moins de pertes.

L'objectif est de proposer la conception d'interrupteurs SiC de forte tenue en tension répondant au cahier des charges visé.

Les potentialités théoriques du diamant pour les composants de puissance haute tension sont encore plus attrayantes que celles du carbure de silicium. Une conductivité thermique la plus élevée connue à ce jour, un champ électrique critique de 10 MV/cm, une grande mobilité des porteurs, des propriétés mécaniques exceptionnelles une inertie chimique jusqu'à des températures élevées en font un matériau de choix pour les applications haute tension forte puissance. Les techniques de dépôt en phase vapeur MWCVD permettent aujourd'hui d'obtenir des couches de diamant sur des surfaces importantes et ouvrent un grand champ d'applications dans notre domaine. Un important travail de mise au point de la filière technologie diamant reste à faire. Ces études seront menées selon trois axes :

- Utilisation du diamant dans l'environnement des semiconducteurs de forte puissance.
- Etude d'un interrupteur haute tension (> 10 kV) à commande optique
- Veille technologique sur le diamant en temps que matériau semi-conducteur à large bande d'énergie interdite

Rôle des différentes équipes

Dans ce PRI, le GdR ISP (Intégration des Systèmes de Puissance) représente le CEGELY pour ses travaux sur le SiC et sur la modélisation, le LAAS pour ses compétences en intégration Silicium et pour son apport technologique, le LEG pour la connectique, le refroidissement, la modélisation et aussi ses travaux sur le SiC, le LGET pour ses compétences en isolation, et le LEEI pour ses compétences sur les structures de convertisseurs et sur les interrupteurs haute tension en diamant. Sur cette partie, interrupteur haute tension en diamant, une collaboration est engagée avec le Laboratoire de Physique des Lasers (UMR 7538).

Les différentes études proposées sont bien évidemment très interdépendantes, afin de proposer une synthèse des différentes voies prometteuses deux séminaires sont prévus dans le cadre des activités d'animation du GdR au milieu et en fin de l'étude.



PRI 6.1 Congélation solaire (-30°C) par procédé thermochimique à partir d'une source thermique solaire basse température (70°C)

Coordonnateur : Driss Stitou

1- CONTEXTE et BUT DU PROJET

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. L'enjeu est également de réduire la consommation en énergie primaire et de limiter les pics de puissance en électricité [1]. Or actuellement, les solutions de production de froid reposent essentiellement sur des systèmes frigorifiques grands consommateurs en énergie électrique. Cette nouvelle demande croissante risque ainsi d'annuler les gains énergétiques obtenus dans le domaine du chauffage (efficacité énergétique des systèmes, isolation des habitats, contrôle/régulation,...). Il convient alors de préparer des solutions acceptables socio-économiquement et adaptées à la satisfaction de ces besoins futurs sans compromettre les engagements internationaux relatifs à la protection de l'environnement, en particulier pour la réduction des gaz à effet de serre (GES) par une diminution de la consommation en énergie fossile, et pour une meilleure protection de la couche d'ozone par une utilisation de fluides frigorigènes neutres. Dans ce contexte le recours à de nouveaux systèmes de production de froid, tels que les systèmes à sorption (absorption liquide /gaz, adsorption solide/gaz ou réaction chimique solide/gaz) couplés à une

source énergétique non polluante en terme de GES (source solaire, source géothermique, rejets thermiques,...) répondrait à ces exigences.

Dans le domaine du rafraîchissement solaire (production de froid positif), il existe diverses techniques émergentes pouvant offrir une alternative aux systèmes classiques à compression : les systèmes à absorption $H_2O/LiBr$ (production d'eau glacée à $7^\circ C$), les systèmes à adsorption silicagel/eau ou zeolithe/eau, les cycle de refroidissement d'air par déshumidification (dessicant evaporative cooling).

Dans le domaine de la réfrigération solaire (entre 0 et $-10^\circ C$), il n'existe que peu de systèmes capable de produire du froid négatif. Ces systèmes utilisent l'ammoniac comme fluide de travail, totalement neutre pour l'environnement. Ce sont principalement des systèmes à sorption liquide/gaz (NH_3/H_2O) ou solide/gaz ($SrCl_2/NH_3$, $CaCl_2/NH_3$) utilisant l'ammoniac comme fluide de travail. Ces systèmes qui permettent au mieux une production de froid à $-10^\circ C$, pour l'obtention de glace solaire, nécessitent une température de source chaude minimale de $120^\circ C$. Ces niveaux de température élevés requièrent une technologie avancée pour la captation solaire, augmentant de façon drastique le coût global du système (utilisation de capteurs sous-vide, de concentrateurs paraboliques ou cylindro-paraboliques).

Dans le domaine de la congélation solaire, c'est-à-dire une production de froid à une température inférieure à $-20^\circ C$, aucun système basé sur la technologie de l'état de l'art n'a actuellement été testé du fait des températures élevées requises par la source chaude. Un verrou technologique doit être levé quant à la captation d'énergie solaire à des température supérieure à $130^\circ C$ avec de bons rendements et des coûts acceptables afin de pouvoir développer des procédés de production de froid basés sur les concepts de cycles classiques simple effet à sorption.

Dans ce contexte, le projet proposé vise à développer un procédé de congélation solaire permettant une production de froid inférieure à $-23^\circ C$ et requérant un bas niveau de température pour la source chaude du procédé (inférieure à $70^\circ C$). Les études préliminaires menées à l'Institut de Matériaux et Procédés, ont permis la définition d'un nouveau concept de procédé basé sur la sorption solide/gaz par réaction chimique [5]. Ce procédé permet de produire du froid à $-23^\circ C$ (avec un évaporateur à $-33^\circ C$) tout en utilisant de la chaleur à basse température de l'ordre $65/70^\circ C$. L'intérêt d'utiliser des capteurs solaires basse température est d'obtenir des rendements de captation élevés de l'ordre 70%. Ainsi le coefficient de performance solaire (SCOP) de l'installation de congélation solaire pourrait atteindre une valeur supérieure à 20%, valeur qui est à comparer à celles des systèmes de rafraîchissement solaire oscillant entre 8 et 20%.

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 auto-adaptatif 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.

2- OBJECTIFS TECHNOLOGIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES

Le procédé de congélation solaire proposé est un procédé thermochimique par nature cyclique, alternant une phase de production de froid suivie d'une phase de régénération grâce à l'énergie solaire. La mise en œuvre d'un tel système n'est possible que par l'utilisation de réactions chimiques renversables entre un solide réactif et un gaz couplés à un changement d'état liquide/gaz. 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 ou le sous-sol. La phase de production de froid a 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 une quantité de chaleur. La chaleur produite par cette absorption est évacuée par rayonnement vers la voûte celeste considérée ici comme un environnement à $0^\circ C$.

Les enjeux technologiques du projet

Un des enjeux technologiques se situe au niveau du capteur solaire intégrant le réacteur contenant le sel réactif. En effet, il doit être capable d'assurer une fonction de chauffage le jour (absorbeur) et une fonction de refroidissement la nuit (radiateur). Ce type de configuration a déjà fait l'objet de recherche dans les années 60 par F. Trombe, mais n'a été que très peu poursuivie. La fonction chauffage utilise l'effet de serre induit par l'utilisation d'un vitrage (opaque aux infrarouges). Cependant, du fait de cet effet de serre, le verre à vitre ralentit considérablement le refroidissement nocturne bien que celui-ci soit corps noir dans l'infrarouge à la température de l'environnement. La fonction refroidissement nocturne pourrait être favorisée par la suppression du vitrage, mais cela diminuerait considérablement le rendement de captation ainsi que la température de la paroi absorbante (augmentation des pertes

thermiques). La problématique essentielle se situe donc au niveau du choix des matériaux à mettre en oeuvre pour favoriser les deux fonctions (par exemple utilisation d'un verre intelligent (photosensible), utilisation du polyéthylène à la place du verre, isolation, sélectivité de la surface absorbante,...), du type de conception (les deux fonctions sont intégrées ou séparées),.... Il y a donc lieu de mener une optimisation en tenant compte d'autres critères tel que le coût de réalisation et la mise oeuvre.

Enfin, du fait de la nature même du procédé qui est discontinu, un stockage de froid est nécessaire si un maintien en température dans l'enceinte de congélation est souhaité. L'inertie thermique de l'ensemble (matériau de stockage + enveloppe) doit faire l'objet d'une étude particulière afin de répondre à cette problématique.

En définitive, au plan technologique et socio-économique, les objectifs sont les suivants :

- Démontrer la faisabilité d'un tel concept de procédé destiné à la production de froid à très basse température (-30°C) à partir d'une source chaude de l'ordre de 60 à 70°C.
- Développer une nouvelle génération de capteurs solaires capable de remplir simultanément une fonction d'absorber le jour et de radiateur la nuit avec des rendements d'au moins 70%.
- Définir les limites de puissance et de capacité de congélation de ce procédé solaire en fonction des conditions opératoires (ensoleillement, températures, vent,...), de la configuration géométrique des réacteurs, de l'inertie thermique de l'enceinte de congélation associant un matériau de stockage par changement de phase.
- Déterminer la fiabilité du maintien en température à -23°C de l'enceinte et donc de la qualité de conservation des denrées alimentaires.
- Identifier les verrous socio-économiques à l'exploitation d'un tel procédé : disponibilité des ressources au regard de la demande (analyse géographique), environnement concurrentiel,...
- Déterminer les seuils d'indicateurs tels que l'efficacité énergétique, les puissances spécifiques (massique ou volumique), ... permettant d'atteindre une rentabilité économique.

3- STRATEGIES : OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET METHODOLOGIE

- au niveau du capteur solaire sur :

Les transferts couplés radiatifs/convection/conduction : le capteur solaire intégrant le réacteur doit être capable d'assurer le transfert d'énergie du rayonnement solaire incident vers la paroi absorbante du réacteur (avec une bonne sélectivité), tout en assurant pendant la phase nocturne le transfert par rayonnement vers le ciel de l'énergie dégagée par le réacteur.

- au niveau du système réacteurs :

Caractérisation des systèmes réactionnels : enthalpie et entropie de réaction, équilibres thermodynamiques, cinétique de réaction, renversabilité des réactions,...

Dimensionnement des réacteurs pour une production continue de froid à -33°C (de puissance moyenne par exemple de 200W ou à définir) utilisant une source thermique à 65°C.

- au niveau de l'utilisation (enceinte de congélation) :

Étude de l'influence de la production discontinue de froid associant un stockage de froid sur la température interne de l'enceinte : optimisation de l'inertie thermique et des temps caractéristiques, conception de l'enceinte, sensibilité aux paramètres.

- au niveau de l'ensemble du dispositif (couplage de tous les composants du système) :

Étude des éléments de liaison thermique entre les trois éléments principaux

Étude des couplages dynamiques des composants et du fonctionnement du système

Modélisation et simulation du procédé sur la base du concept thermique nodal en fonction de différents scénarii (conditions extérieures, vent,...). Étude de sensibilité à divers paramètres.

Optimisation thermo-économique de ce procédé par une approche basée sur la thermodynamique en dimensions finies.

4 - MOYENS HUMAINS IMPLIQUES

Unité / Equipes	Participants et contributions	Domaine de Compétences
IMP-CNRS UPR 8521 Perpignan	* Driss STITOU (IR) : 50 % * Nolwenn LEPIERRES (Doct.) : 100 % * Nathalie MAZET (CR) : 20 % * Pierre NEVEU (MdC) : 15 % * B. SPINNER (Pr) : 5 %	* Sorption solide/gaz (production, stockage et transport de froid et de chaleur) * Modélisation des transferts de chaleur et de masse couplés dans les milieux poreux * Dimensionnement, optimisation de réacteurs solide/gaz * Analyse et optimisation thermodynamique de systèmes

LET-ENSMA UMR 6608 Poitiers	Equipe Système * François PENOT (DR) : 5 % * Alain ALEXANDRE (MdC) : 10 % Equipe Rayonnement * Philippe BENABDALLAH(CR):15 % * Vital LEDEZ (CR) : 15 % * Denis LEMONNIER (CR) : 15 %	* Rayonnement semi-transparent * Optimisation multi-couche et couche mince * Surfaces sélectives * Transferts couplés rayonnement/convection/conduction * Analyse système / boucle diphasique
LESETH EA 810 Toulouse	* Françoise MONCHOUX (Pr) : 20 % * Bérangère LARTIGUE (MdC): 20% * Françoise THELLIER (MdC) : 5 % * Marie-Catherine MOJTABI (Pr) : 10% * Bruno LACARRIERE (Doct.) : 20% * Jean-Louis JOLLY (MdC) : 5% * Marc MISCEVIC (MdC) : 5%	* Thermique de l'habitat * Modélisation TRNSYS * Rayonnement * Transfert dans les milieux à forte inertie



PRI 6.2
Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques-thermiques au bâti : optimisation de la production, du stockage et de l'utilisation de l'énergie

Coordonnateur : Christophe Ménézo

LABORATOIRES PARTENAIRES DU PROJET

<i>Laboratoire</i>	<i>Localisation</i>	<i>Responsable Scientifique</i>
LMSC-LEEAM EA 2200	Université de Cergy	Rachid Bennacer
LOCIE	Université de Savoie	Gilles Fraisse
CETHIL * UMR 5008	INSA de Lyon / UCB Lyon1	Christophe Ménézo*
CENERG	Ecoles des Mines de Paris	Bruno Peuportier
UMR 6134	Université de Corse	Nadine Levratto Alain Louche

* Coordonnateur du projet

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

□ **Introduction :**

L'intégration au bâti de modules photovoltaïques et la technique du raccordement au réseau récemment reconnue en France par les accords d'EDF sur le rachat de l'électricité produite par les centrales photovoltaïques, constituent une nouvelle donne pour le développement de cette filière. Au regard du potentiel de surfaces à couvrir, cette intégration au bâti de modules photovoltaïques en tant qu'éléments de construction représente la solution la plus prometteuse pour l'industrie, mais aussi en terme de capacité de production d'électricité.

Cependant, le risque d'échauffement des modules mis en œuvre dans le cadre bâti peut conduire à une dégradation de leur efficacité électrique. Des solutions techniques sont donc à envisager pour maintenir une température de fonctionnement optimale des modules photovoltaïques quel que soit leur mode d'intégration à l'enveloppe du bâtiment (principalement en toiture ou en façade) et ne pas nuire à

leur rendement. D'autre part, la récupération de chaleur au niveau des modules améliore l'efficacité énergétique du système. Cette évolution tendra à imaginer des modules hybrides photovoltaïques-thermiques.

Deux types de capteurs hybrides seront étudiés : les capteurs hybrides à eau et à air participant ainsi à l'autonomie énergétique de l'habitat à travers la production d'électricité et le pré-chauffage de l'eau chaude sanitaire et/ou de l'air de ventilation des locaux. Cette étude intégrera 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 avec le comportement thermique de l'enveloppe et des systèmes de chauffage de base.

□ Objectifs scientifiques :

Les objectifs scientifiques de ce projet peuvent être regroupés en trois grandes phases qui sont développées en parallèle et en commun par les différents partenaires.

Phase 1 : Développement de modèles prédictifs fins des composants hybrides.

Cette phase est développée par le CETHIL et le LEEVAM et se décompose en trois actions.

- *Modélisation fine du comportement thermique des modules photovoltaïques.* Le CETHIL développe un modèle fin couplant rayonnement et conduction en milieu semi-transparent multi-couches soumis à un éclairage diffus et collimaté. L'objectif de ce modèle est de pouvoir évaluer la température des cellules photosensibles. Les paramètres de ce modèle seront renseignés en partie par des mesures effectuées au laboratoire.

- *Modélisation fine du comportement du régime de transfert turbulent dans les capteurs.* Le LEEVAM travaille sur la modélisation des transferts turbulents en convection naturelle. L'objectif de cette phase est de favoriser l'amélioration du tirage thermique et l'homogénéisation de la température au niveau du capteur avantageant un régime d'écoulement turbulent.

- *Couplage des modèles issus des actions précédentes afin d'obtenir un modèle comportemental fin d'un module hybride photovoltaïque-thermique.* Cette action est menée par le CETHIL et le LEEVAM et doit conduire à déduire des paramètres d'entrée de modèles simplifiés développés dans la phase 2

Phase 2 : *Elaboration de modèles simplifiés de composants hybrides et intégration au bâti*

Deux types de capteurs hybrides sont étudiés dans ce projet : capteurs électrique/thermique à air et capteurs électrique/thermique à eau. De ces deux technologies l'évaluation de leur performance pour différentes configurations d'intégration (par ex : double peau pour l'air ou composant à part entière pour l'eau), la gestion énergétique (régulation, échangeurs, stockage) de ces capteurs intégrés au bâti est très différentes puisque l'énergie thermique récupérée servira soit au préchauffage de l'air des locaux, soit au préchauffage de l'eau chaude sanitaire. Le CENERG s'attache à l'élaboration de modèles de capteurs hybrides à air et à l'étude de leur performance et de leur gestion en phase de couplage au bâtiment. Le LOCIE s'intéresse pour sa part aux capteurs hybrides à eau, à leur couplage aux autres composants de production et de stockage d'eau chaude sanitaire et de chauffage (ballons de stockage, plancher chauffant et bâtiment).

L'exploitation des résultats de cette phase permettra de dégager des règles concernant : la performance énergétique de chaque technologie, la performance en confort, l'évaluation des performances en fonction de la taille et de la disposition des éléments, la performance économique de chaque dispositif.

Phase 3 : *Aspects socio-économiques.*

Cette phase consiste à analyser les aspects socio-économiques par la confrontation des éléments techniques liés à l'utilisation des capteurs hybrides à la demande sociale. Cette phase est développée par l'UMR 6134. L'intégration des énergies renouvelables dans le bâtiment sera considérée du point de vue des usages et besoins observés dans les petites économies insulaires, la Corse notamment, considérées comme des modèles réduits de systèmes pouvant bénéficier de l'intégration des ENR.

□ Moyens expérimentaux pour les capteurs hybrides :

Deux expérimentations sont envisagées afin de renforcer les phases 1 et 2. La première consistera à implanter des capteurs hybrides électriques/thermiques à air et/ou à eau en façade sud d'une cellule PASSYS appartenant au CSTB. Un monitoring précis des composants hybrides devrait permettre de valider les modèles développés en phase 1. Ces mesures et celles concernant le comportement thermique de la cellule permettront de compléter la phase 2. La seconde expérimentation actuellement à l'étude concerne l'installation d'une façade, à l'Université Claude Bernard Lyon1 (CETHIL), de type double-peau (capteur hybride à air). L'installation de cette façade de 6 mètres de hauteur environ permettrait d'affiner les études menées en convection naturelle de manière à favoriser le tirage thermique.

□ Soutiens industriels :

Ce P.R.I. CNRS est soutenu par le C.S.T.B / Département Développement Durable situé à Sophia Antipolis. Le CSTB mettra à disposition les mesures expérimentales qui seront réalisées sur la cellule PASSYS dans le cadre d'une thèse qu'il cofinance avec l'ADEME et qui est encadrée au CETHIL. Les entreprises B.P. Solar fabricant de modules PV et Clipsol fabricant de capteurs solaires sont potentiellement intéressées par la mise en place d'un prototype pouvant être instrumentée et permettant de renforcer les phases 1 et 2.



GAT 7

Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration

Coordonnateur : Alain Ferrière

La production de chaleur à partir de la concentration du rayonnement solaire dans un réacteur est une solution particulièrement intéressante du point de vue du rendement énergétique et de l'impact climatique. De plus des températures élevées sont obtenues par la concentration, ce qui permet de piloter des réactions difficiles ou coûteuses à effectuer par des techniques conventionnelles. Les produits de réaction, vecteurs d'énergie comme l'hydrogène ou matériaux à coût énergétique élevé comme le silicium ou certains produits carbonés (noirs de carbone, fullerenes,...) constituent un enjeu majeur. La production d'électricité à partir de la chaleur solaire au moyen de cycles thermodynamiques (conventionnels à eau ou à gaz, avancés grâce à des transformateurs thermochimiques) demeure bien entendu un autre enjeu. L'analyse de projets de recherches scientifiques innovants, de programmes de développements technologiques et des coûts associés, a motivé la mise en place de ce GAT. Ses principaux objectifs et quelques verrous à franchir sont brièvement indiqués ici.

Objectifs :

1. Identifier les acteurs potentiels dans les organismes de recherche (publics et privés) et dans les entreprises des secteurs avals concernés (production d'énergie électrique, de chaleur, synthèse de matériaux par procédés à hautes températures).
2. Essayer de constituer une communauté nationale pour augmenter la taille du groupe d'analyse, actuellement sous-critique.
3. Examiner la situation de la recherche Française dans le contexte international.
4. Susciter des projets de recherche à la fois nouveaux et prometteurs.

Verrous :

1. Les dispositifs de concentration du rayonnement solaire ne permettent pas aujourd'hui d'obtenir des puissances élevées (typiquement 100 MW) à une température élevée (typiquement 900°C et plus). C'est précisément cette gamme de puissance et de température qui offre les perspectives d'applications économiquement intéressantes pour l'utilisation de la chaleur solaire.
2. Il n'existe aujourd'hui aucune installation industrielle qui utilise l'énergie solaire concentrée, même en complément à une ressource fossile, pour produire de l'électricité ou des produits à haute valeur ajoutée dans des conditions économiques acceptables.
3. Avec une très large part d'électricité d'origine nucléaire, la France occupe une position unique en Europe, qui permet de maintenir un impact climatique acceptable sans recourir de façon urgente à des solutions alternatives. Le contexte national a longtemps été défavorable à l'émergence de programmes nationaux dans le domaine du solaire thermique.



PRI 8.1

Communauté d'Analyse et de Recherche des Nouvelles Orientations de la Thermodynamique (Carnot)

Coordonnateur : Pierre Neveu

Résumé

L'objectif de ce programme est de constituer une communauté scientifique reconnue autour des nouvelles méthodes de la thermodynamique. L'une des premières tâches sera d'uniformiser si possible les différentes approches existantes, ou d'identifier si nécessaire les champs d'applications privilégiés de chaque méthodologie. Plusieurs développements récents sont ici concernés : l'analyse entropique ou exergétique, la thermodynamique en temps fini, la thermodynamique des processus irréversibles. La pluridisciplinarité des participants permet de couvrir un large champ d'application qui va de la mécanique des fluides au génie des procédés.

Le fonctionnement repose tout d'abord sur la mise en place d'un espace de discussion électronique entre les participants, où il sera soumis plusieurs problèmes à réflexion. Les résultats feront l'objet de publications scientifiques communes, ou de rapports internes dont une version publique sera disponible en ligne sur le site internet du programme. Ce site sera la fenêtre extérieure des activités de la communauté, et devrait devenir au fil du temps un véritable centre de ressources pédagogiques ouvert à la fois aux enseignants, aux chercheurs et aux industriels.

Objectifs scientifiques

Les différentes contributions relevant de la thermodynamique, tant scientifiques que pédagogiques, souffrent souvent d'une incompréhension due à une multitude d'outils, de langage, et de conventions. L'un des premiers objectifs sera donc d'uniformiser si possible les différentes approches, ou d'identifier si nécessaire les champs d'applications privilégiés de chaque méthodologie. Plusieurs développements récents sont ici concernés : l'analyse entropique ou exergétique, la thermodynamique en temps fini, la thermodynamique des processus irréversibles.

En ce qui concerne les champs d'application, il s'agit tout d'abord de l'analyse des cycles et plus généralement des machines thermodynamiques : -soit pour l'optimisation et le contrôle optimal des systèmes existants, -soit pour l'expertise des procédés émergents, -soit enfin, pour la définition de nouveaux concepts d'utilisation de l'énergie, tant pour sa production ou transformation (froid, chaleur, travail) que pour la transformation de la matière (génie chimique).

L'impact environnemental sera également l'un des thèmes importants de ce programme, le but étant de quantifier, à partir d'une analyse thermodynamique globale restant à définir, les émissions de GES inhérentes à tous procédés de production, de transformation ou de recyclage d'énergie ou de matière.

Enfin, le développement de nouveaux concepts d'utilisation de l'énergie est également visé par ce programme, en particulier au travers des phénomènes dynamiques et instationnaires.

Il apparaît clairement que de telles tâches requièrent une communauté scientifique fortement liée autour de la thermodynamique mais dont la pluridisciplinarité du point de vue applicatif sera la clé du succès et de la reconnaissance de CARNOT.

La reconnaissance de cette communauté par les acteurs des autres PRI ou GAT pourra également aboutir (c'est en tout cas l'un des objectifs visés) à l'expertise des nouveaux procédés issus du programme ENERGIE.

Enfin, la diffusion scientifique et l'aspect pédagogique ne seront pas oubliés. La mise en place d'un site Internet sera la fenêtre visible des activités liées au programme, et devra devenir au fil du temps un véritable centre de ressources pédagogiques ouvert à la fois aux enseignants, aux chercheurs et aux industriels.

Stratégie de Recherche

Le programme concerne essentiellement une activité de réflexion, de confrontation et de synthèse autour des différentes méthodologies développées pour le dimensionnement, l'optimisation et le contrôle des installations relevant du génie des procédés.

La diversité des équipes impliquées (voir liste jointe), nécessaire au succès du programme, requiert en contre-partie des moyens de communication rapides, souples et efficaces entre tous les participants. La mise en place immédiate d'un site Internet assurera cette fonction.

La structure du site sera calquée sur le mode de fonctionnement du programme, à savoir, une zone à accès réservé aux participants pour la communication interne, et une zone publique, véritable fenêtre des activités de la communauté CARNOT, qui devrait à terme devenir, d'une part un centre de ressources pédagogiques ouvert aux enseignants et étudiants, et d'autre part un lieu privilégié de contact entre chercheurs et industriels.

Le forum CARNOT

La mise en ligne du *forum CARNOT*, dont l'accès sera réservé au membre du PRI, permettra la diffusion et la confrontation quasi-immédiate des réflexions propres à chaque participant. Ce forum présente plusieurs cas d'école, permettant aux différents participants de présenter leurs méthodes d'analyse, et de recevoir en retour les critiques de leurs collègues.

Chaque problème fera l'objet d'un rapport de synthèse à l'issue d'une période de 2 ou 3 mois, rédigé avec l'ensemble des acteurs ayant contribué sur le sujet. Ce rapport constituera la base de publications scientifiques communes, et une version publique sera mise en ligne sur la zone publique du site Internet (voir ci-dessous). Les problèmes proposés porteront à la fois sur les concepts primaires de la thermodynamique, et sur des applications finalisées.

Ces échanges seront par ailleurs complétés par l'organisation de *réunions thématiques*, ouvertes aux participants du programme, et ciblées sur un problème ou une thématique spécifique, qui permettront :

- la confrontation directe des différents points de vue,
 - la préparation d'un rapport de synthèse,
 - de décider des nouveaux problèmes à ouvrir sur le forum.
- La fréquence prévue pour ces réunions thématiques est de 2 à 3 par an.

La première réunion thématique se déroulera du 3 au 5 février 2003.

La reconnaissance extérieure

La *zone publique* du site présentera les activités de CARNOT. Le but est d'une part, de se présenter comme centre de ressources pédagogiques pour l'enseignement supérieur, et d'autre part comme centre d'expertise et de valorisation de la recherche pour les industriels. Il doit également amener d'autres chercheurs à intégrer la communauté, afin d'ouvrir nos réflexions à d'autres domaines, en particulier, l'environnement et la socio-économie.

Pour cela, les rapports issus des problèmes abordés dans le Forum CARNOT, et/ou au cours des réunions thématiques, seront mis en ligne, sous une forme allégée et vulgarisée si nécessaire.

Par ailleurs, le centre organisera des *séminaires*, ouverts aux chercheurs, doctorants et ingénieurs, dont les participants à CARNOT seront les conférenciers privilégiés. D'autres personnalités scientifiques pourront être également invitées. L'objectif de ces symposiums sera essentiellement de présenter, sur des problèmes réels de dimensionnement ou d'optimisation d'installation les progrès qu'aura amenés la thermodynamique.

Le premier séminaire est prévu au début de l'été 2003.

Annexe : les différentes équipes impliquées
Participants, méthodologie, problématiques scientifiques et domaines finalisées

Nombre d'équipes : 10

Nombre de participants : 32 (31 permanents + 1 ATER)

<i>Unité de Recherche</i>	<i>Participants</i>	<i>Mèl</i>	<i>Méthodologie</i>	<i>Domaines Finalisés/problématiques scientifiques</i>
Laboratoire des Moteurs et Turbo-Machine, EA1408, CNAM, 292, rue St Martin, 75141- Paris Cedex 03	Georges. Descombes (MCF) Christelle Perilhon (MCF) <u>Michel Pluviose</u> (PR)	descombe@cnam.fr perilhon@cnam.fr pluviose@cnam.fr	Analyse exergetique	Combustion, Moteur à combustion interne, Turbine à Gaz Optimisation de la combustion et des écoulements
LEMTA-UMR 7503 2, av de la Forêt de Haye 54504 Vandœuvre-les-Nancy	Riad Benelmir (MCF) <u>Michel. Feidt</u> (PR) Rahal. Boussehain (MCF)	riad.benelmir@ensem.inpl-nancy.fr michel.feidt@ensem.inpl-nancy.fr rbousseh@ensem.inpl-nancy.fr	Thermodynamique en temps fini Analyse entropique Analyse exergetique	Froid (compression de vapeur et adsorption), Echangeurs Optimisation des surfaces d'échange, transitoire lent
CENERG, Ecole des Mines de Paris, 60, bd Saint Michel, 75272 Paris cedex 06	<u>Renaud Gicquel</u> (PR) Dominique Marchio (PR) Diogo Queiros-Conde (MCF)	renaud.gicquel@cenerg.ensmp.fr marchio@cenerg.ensmp.fr queiros-conde@cenerg.ensmp.fr	méthode du pincement, modélisation systémique, analyse exergetique des cycles	Centrales électriques avancées, Cogénération, Cycles combinés, Analyse et optimisation des systèmes complexes
CETHIL, UMR 5008 INSA, Bât S. Carnot, 9, rue de la physique 69621 -Villeurbanne cedex	<u>André. Lallemand</u> (PR)	a.lal@cethil.insa-lyon.fr	Analyse exergetique des cycles	Froid, Chaleur, Moteur Analyse des cycles combinés Analyse des installations réelles
IMP-CNRS, UPR 8521, Tecnosud 66100 Perpignan Cedex	Nathalie. Mazet (CR) Pierre Neveu (MCF) Bernard Spinner (PR) Driss Stitou (IR)	mazet@univ-perp.fr neveu@univ-perp.fr spinner@univ-perp.fr stitou@univ-perp.fr	Approche constructale, Thermodynamique des processus irréversibles, Dipôle exergetique, Thermodynamique en temps fini, Modélisation dynamique	Sorption solide (froid et chaleur : production, stockage et transport) Optimisation des réacteurs solide/gaz Analyse et optimisation des systèmes

LAIL, UPRESA, CNRS, 8021, Université des Sciences et Technologies de Lille, Bât. EUDIL, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex	Anne-lise Gehin (MCF) Belkacem Ould Bouamama (MCF) Geneviève Dauphin-Tanguy (PR) Marcel Staroswiecki (PR)	Anne-lise.Gehin@univ-lille1.fr belkacem.bouamama@univ-lille1.fr gdt@ec-lille.fr marcel.staroswiecki@univ-lille1.fr	Modélisation et surveillance par 'Bond graph' des systèmes thermodynamiques	Modélisation des systèmes thermofluides Surveillabilité, commandabilité et placement optimal des capteurs
CNRS-LIMSI (UPR 3251), BP 133, 91403 Orsay Cedex	M. Pons (CR)	pons@limsi.fr	Analyse entropique complète des écoulements, simulation numérique	Contrôle actif des écoulements (transferts thermiques avec convection) Thermodynamique des écoulements, phénomènes instationnaires
LaTEP -Université de Pau et des Pays de l'Adour, av. de l'université 64000 Pau	Jean Pierre Bédécarrats (MCF) Jean Castaing-Lasvignottes (MCF) Jean Pierre Dumas (PR) Francoise Strub (MCF) Pascal Stouffs (PR)	jean-pierre.bedecarrats@univ-pau.fr jean.castaing@univ-pau.fr jean-pierre.dumas@univ-pau.fr francoise.strub@univ-pau.fr pascal.stouffs@univ-pau.fr	Analyse exergetique, simulation des procédés	Stockage par chaleur latente Machines volumétriques alternatives Cycles trithermes
Ecole des Mines de Nantes Departement Systèmes Energétiques et Environnement (DSEE) La Chantrerie, 4 Rue Alfred Kastler BP 20722, 44307 Nantes cedex 03	Jérôme Bellettre (MA) Olivier Le Corre (MA) Mohand Tazerout (MA)	Mohand.Tazerout@emn.fr	Analyse thermodynamique de la combustion	Cogénération par moteur à gaz Valorisation énergétique des déchets (méthanisation, gazéification), mode dual
LSGC, UPR 6811 1, rue de Grandville BP 451 54001 Nancy cedex	Lingai Luo (MCF) Daniel Tondeur (DR), Dominique Alonso (ATER) Thierry Cachot, (PR) Pierre Le Goff (PR)	luo@ensic.inpl-nancy.fr tondeur@ensic.inpl-nancy.fr alonso@ensic.inpl-nancy.fr cachot@ensic.inpl-nancy.fr legoff@ensic.inpl-nancy.fr	Approche constructale Thermodynamique en temps fini Théorème d'équipartition des productions d'entropie	Echangeurs, séparateurs, machine thermochimique



PRI 8.2 Microéchangeurs

Coordonnateur : Monique Lallemand

Le domaine couvert par ce projet est plus large que le titre ne pourrait le laisser penser car il concerne non seulement les microéchangeurs, mais aussi les miniéchangeurs. Les dimensions des sections de passage du fluide dans les canaux varient de la dizaine de micromètres à 2 ou 3 millimètres.

Objectifs des études

Le développement des microtechnologies et des micro-usinages a permis la réalisation de composants miniaturisés dans un grand nombre de domaines nécessitant en accompagnement le développement de microéchangeurs pour leur contrôle thermique. Ainsi, ce thème suscite un intérêt croissant de par la forte potentialité de ses applications. Différents objectifs apparaissent pour la conception et le développement de microéchangeurs performants, aussi bien dans le domaine des échangeurs monophasiques que dans celui des échangeurs diphasiques.

- Détermination du comportement thermohydraulique des écoulements en canaux aux petites échelles. En écoulement monophasique, il s'agit de savoir jusqu'à quelle réduction d'échelle les lois macroscopiques restent valables, sinon quelles sont-elles? En écoulement diphasique, il faut introduire les effets capillaires qui modifient notablement le comportement du fluide au cours des changements de phase.
- Développement d'une métrologie adaptée aux petites échelles. Jusqu'à présent, les études de ces systèmes, qui restent globales, permettent uniquement la détermination des performances. Pour développer des méthodes prédictives, il est nécessaire d'avoir une approche locale. Le développement de capteurs de mesures précis et non intrusifs est un enjeu capital de ce projet ainsi que leur implantation et le traitement des données.
- La réalisation des microéchangeurs et la connexion de ces systèmes miniaturisés avec les réseaux fluidiques environnants restent des points à maîtriser.

Stratégie des recherches

La richesse de ce projet réside partiellement dans le nombre important de laboratoires qui collaborent (7). Cela a permis d'envisager simultanément des études sur des échangeurs mono- et diphasiques. La voie envisagée est essentiellement une approche expérimentale. Afin de déterminer les mécanismes prépondérants qui régissent les échanges thermiques dans ces systèmes, il a été délibérément choisi de travailler sur des configurations simples pour mieux découpler les phénomènes et maîtriser les débits et conditions aux limites. L'approche système n'est actuellement abordée que par le Greth. A l'issue de la première réunion des partenaires du PRI, l'éventail des conditions expérimentales a été limité quant aux géométries testées (canaux rectangulaires), aux couples fluide/matériau et la segmentation des conditions imposées thermiquement. Ainsi, des géométries semblables sont traitées par les différents laboratoires avec leur savoir-faire propre et leurs méthodes de mesures particulières.

Contribution de chaque équipe

Microéchangeurs avec convection en simple phase

LEGI - L'objectif des recherches menées au LEGI porte sur les effets d'échelles dans les écoulements à taille submillimétrique. A partir d'expériences effectuées avec des canaux de parois très lisses, les caractéristiques globales des microcanaux (pertes de charge) sont mesurées. Les efforts vont porter sur l'influence des rugosités de paroi sur l'hydrodynamique et les transferts de chaleur dans les microcanaux. La première étape est la mise au point de parois rugueuses de bonne planéité d'ensemble avec des rugosités de taille contrôlée. Le principe repose sur l'électrodéposition de particules de carbure de silicium. Ensuite la détermination des coefficients d'échange locaux sera effectuée à l'aide d'une cellule à chauffage segmenté.

LEMTA - L'étude expérimentale comporte deux volets (version froide et version chaude). Dans la version froide, l'évolution axiale des contraintes pariétales en écoulement liquide monophasique (eau) isotherme et diphasique (eau/azote) sera étudiée pour un canal rectangulaire à rugosité contrôlée. Ce canal sera instrumenté de sondes électrochimiques simples afin d'accéder au gradient pariétal de vitesse et de sondes rectangulaires doubles pour connaître la direction de l'écoulement. L'objectif est de vérifier le caractère local ou non du coefficient de frottement. Les régimes d'écoulement seront caractérisés par caméra vidéo. Pour la version chaude, la densité de flux pariétal sera estimée en utilisant comme paroi du canal une plaque bicouche assurant le chauffage par effet Joule et le transfert thermique vers le fluide. L'utilisation conjointe de la thermographie infrarouge et de techniques inverses permettra d'accéder aux températures.

IUSTI - En écoulement monophasique, ce laboratoire propose une méthode originale pour accéder aux lois de pertes de charge. Il s'agit d'une détermination du coefficient de pertes de charge à partir d'une méthode expérimentale soignée pour un écoulement en régime laminaire transitoire (mesures des pressions) et du traitement des données par intégration. L'influence de la charge ionique du fluide sera étudiée.

Laboratoire de Thermocinétique - La contribution de ce laboratoire porte actuellement sur la détermination de coefficients d'échange locaux pour un écoulement monophasique laminaire dans des canaux rectangulaires usinés dans de l'acier inoxydable.

Microéchangeurs avec changement de phase liquide-vapeur

CETHIL - Afin de découpler les phénomènes d'ébullition confinée et la convection forcée du fluide, il est important d'étudier l'effet du confinement seul. Le travail porte sur l'étude des configurations d'écoulement et des transferts thermiques au cours de l'ébullition confinée en convection naturelle dans le cas de canaux étroits. L'étude expérimentale est réalisée pour un canal vertical chauffé par un bloc segmenté afin d'imposer un flux local. Des mesures locales à l'aide de capteur de pression implanté en paroi et de thermocouples permettront d'analyser les instabilités observées également en ébullition convective afin d'en comprendre l'origine. Les températures de parois seront mesurées par cristaux liquides. Les transferts thermiques pariétaux en seront déduits.

IUSTI - L'objectif de l'étude est de caractériser les transferts de chaleur pour l'ébullition convective dans des microcanaux. Comme ils sont fortement dépendants des configurations d'écoulement, leur détermination est primordial. Un autre point abordé est la mise en évidence de phénomènes d'instationnarités hydrodynamiques avec leurs critères d'apparition. Cela nécessite des mesures locales de pression, de température et de taux de vide. La recherche de l'origine de ces instabilités, qui peuvent conduire à un assèchement temporaire de la paroi, est importante.

LEGI - Une autre équipe du LEGI développe une cellule d'essais pour caractériser les transferts en ébullition convective pour des conditions de refroidissement de piles à combustible. Le champ moyen de températures sera obtenu par cristaux liquides encapsulés et le champ instantané par cristaux liquides non encapsulés.

Pour toutes ces études en convection diphasique, des observations des écoulements seront effectuées sur des microcanaux comportant une face transparente à l'aide de caméra vidéo ou de caméra rapide. Certains des laboratoires effectuant actuellement des études en convection monophasique envisagent d'appliquer à plus long terme leurs méthodes à l'ébullition.

Mesures

CRTBT - Ce laboratoire, de par ses compétences en micro- et nanofabrication (plate-forme 'nanofab'), peut fournir de nombreux outils dédiés aux micro- et nanotechnologies. Il va développer une métrologie adaptée aux petites échelles et utilisable par tous les partenaires. Le but à moyen terme est de développer un protocole expérimental permettant l'intégration de capteurs de pression et de température dans des microcanaux en silicium. La méthode retenue est l'élaboration de jauges de contraintes en Cu-Ni déposées sur une membrane en contact avec le microcanal. En parallèle, sont réalisés des éléments chauffants micrométriques et des thermomètres de taille réduite à partir de dépôts de platine.

Microéchangeurs

GRETH - La contribution du GRETH s'inscrit dans le vaste cadre du développement de microéchangeurs monophasiques en polymère au CEA. Elle concerne tout d'abord la définition des applications potentielles des microéchangeurs et des retombées économiques attendues dans le domaine industriel. Ensuite, le

GRETH étudie le système complet ; un microéchangeur en polycarbonate est en cours de conception et réalisation. Cette étude servira de support pour réfléchir aux méthodes de fabrication industrielle permettant de réaliser des microstructures précises et à bas coût. Elle permettra de valider les calculs thermohydrauliques dans une structure réelle à microcanaux. Elle servira également de support pour la mise au point de méthodes de visualisation d'écoulements et la validation des mesures de température et de pression locales (en collaboration avec le LEGI et le CRTBT).



GAT 9 Production, stockage et transport de la chaleur et du froid

Coordonnateur : André Lallemand

Le GAT 9 est constitué par un noyau de 8 laboratoires. Suite à la première réunion (25 juillet), trois sous-groupes de réflexions ont été constitués. Une seconde réunion plénière s'est tenue le 29 octobre.

Les **objectifs rapprochés et modes d'action** que s'est assigné le GAT sont les suivants :

- dans un *premier temps*, mener une réflexion "en interne" sur les divers techniques et procédés liés à la thématique afin :
 1. de les répertorier,
 2. de les analyser (rapidement sur la base de la seule expertise de chacun) afin d'en dégager les éléments qui, a priori, constituent un frein à leur développement (verrous),
 3. de proposer, dans l'immédiat des axes de recherche forts (en vue de l'appel d'offres 2003).
- cette première phase étant réalisée (en 2002), il s'agira *ensuite* d'approfondir certains points particulièrement intéressants, aussi bien sur le plan de la recherche que sur celui des applications. Après choix des sujets à analyser, un canevas de travail sera proposé à des groupes de réflexions élargis à d'autres chercheurs que ceux impliqués dans le GAT (notamment d'autres disciplines) et à des acteurs du secteur aval : industriels, représentants de centres techniques, éventuellement membres de collectivités, etc.
- *parallèlement*, et pour alimenter la réflexion des groupes spécifiques, des études ponctuelles (documentaires ou de faisabilité ou encore d'ordre de grandeur, etc.) seront confiées à des structures diverses (équipes de laboratoires de recherche, groupes d'étudiants, ...).

À terme, l'**objectif** est de pouvoir constituer un "livre blanc" des activités de recherche (voire de développement) à conduire, en priorité et pour une durée de l'ordre de la décennie, dans la thématique du GAT, d'identifier les acteurs de recherche de diverses disciplines qui potentiellement apparaissent comme les mieux placés pour conduire ces recherches et d'associer les industriels compétents pour développer les procédés issus de la recherche.

Les réflexions menées au cours des premiers mois de déroulement du programme ont permis d'établir la **hiérarchisation des verrous ou des activités à développer** comme suit, selon les trois domaines analysés par chaque sous-groupe :

Machines et systèmes de production de chaleur ou de froid

- Analyse temporelle du fonctionnement des systèmes. Machines à flux énergétique continu ou variable pour une utilisation continue de niveaux de puissance différents, ou une utilisation discontinue
- Minimisation de taille (poids ou charge) pour les machines de production de froid (ou de chaud)
- Etudes complémentaires sur : machines à compression (fluides, huile) ; machines à sorption ; pompes à chaleur ; cogénération ; trigénération
- Systèmes particuliers (effet Peltier, tension superficielle, etc.)
- Production de chaleur ou de froid : autonome en énergie (PRI 9.2.) ; à partir de solaire, biomasse, déchets (relation autres GAT - PRI)

- Domotique thermique (relation avec GAT 6)

Stockage de l'énergie thermique

- Stockages "statiques" : surfusion des MCP encapsulés, recherche d'agents nucléants à faible coût ; comportement des stocks horizontaux et maîtrise de la stratification ; maîtrise de l'équilibre à la fusion des eutectiques et surtout des péritectiques ; recherche de MCP "bon marché" pour températures positives ; connaissance et maîtrise du positionnement des MCP dans le stock
- Stockages "dynamiques" (frigoporteurs ou caloporteurs) : élaboration des coulis de glace ; maîtrise des écoulements de fluides diphasiques à densités différentes ; amélioration de la connaissance des transferts thermiques en situation diphasique avec changement de phase ; dispositif de détermination en continu de l'état du fluide frigo ou caloporteur ; études sur les microémulsions et les microencapsulation
- Étude des systèmes globaux comprenant à la fois le stockage et son environnement "réseau"

Réseaux de chaleur ou de froid

- Optimisation des systèmes énergétiques (composants, ensemble de composants dans un réseau) à partir de l'adaptation de diverses méthodes : méthodes thermodynamiques basées sur les grandeurs entropiques ou exergetiques (cf CARNOT) ; réseaux de neurone ; approches statistiques ; algorithmes génétiques
- Approche multi-échelles : réseaux = structures multi-échelles par la taille des composants et la diversité des temps caractéristiques \Rightarrow systèmes arborescents \Rightarrow théorie fractale ou théorie constructale
- Réseaux : fluides caloporteurs ou frigoporteurs adaptés (cf stockage) ; particularités des réseaux de petite taille (décentralisation des sources énergétiques) et leur optimisation



PRI 9.1 Réseaux de distribution du froid

Coordonnateur : André Lallemand

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

Préambule

Cinq laboratoires participent au PRI 9.1. Deux sont des UMR (CETHIL, Lyon et LBHP, Paris), l'un est universitaire (LaTEP, Pau), les deux autres appartiennent à des établissements hors université (CEMAGREF pour l'UR GPAN et CEA pour le GRETH). 8 personnes, en équivalent temps plein (16 personnes physiques), sont affectées à ce projet dont 4,6 chercheur confirmés, 0,6 ingénieur d'étude ou technicien et 2,8 étudiants de 3^{ème} cycle.

L'ensemble de ces laboratoires avaient déjà une expérience de recherche complémentaire sur les *frigoporteurs diphasiques*, plus particulièrement, pour quatre d'entre eux, sur les *coulis de glace* formés à partir de solutions eau-alcool éthylique. Parallèlement, trois de ces laboratoires avaient réalisé une étude sur l'emploi de gels organiques ultra-poreux pour emprisonner un MCP (eau), l'ensemble, dit *coulis de glace stabilisé*, étant suspendu dans un liquide non mouillant.

Objectif de l'étude

Le PRI a pour objet de *participer au développement de solutions alternatives à l'usage des fluides frigorigènes classiques pour le transport de froid*, notamment dans des réseaux de distribution. Plus

particulièrement, il concerne les solutions qui utilisent les *fluides frigoporteurs diphasiques* (FFD). Dans ce domaine, les études sur les coulis de glace apparaissent comme déjà bien avancées, quoique nécessitant encore d'importantes études de base pour rendre le procédé réellement opérationnel et optimisé. En revanche, les solutions dans lesquelles l'élément à changement de phase est retenu dans une enveloppe, ce qui évite la formation des cristaux de solide sur les parois de l'évaporateur de la machine frigorifique, sont quasi inexistantes ou, pour le moins, dans une phase de prospective. Considérant l'intérêt potentiel de ces fluides, il apparaît 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*.

Projet et stratégie de recherche

Les travaux antérieurs ont montré la nécessité de repenser les études expérimentales faites pour caractériser les propriétés de transferts (thermique et rhéologique) de ces FFD, ainsi que leur propriétés mécaniques, leur résistance aux cyclages mécanique et thermique, etc. Les recherches concernant la modélisation, notamment en matière d'écoulement de ce fluide non newtonien, de transfert thermique et de prise en compte de surfusions éventuelles, sont également à poursuivre. Enfin, il apparaît indispensable de travailler en amont sur le matériau (actuellement un gel organique) et son couplage avec divers MCP potentiels et divers fluides de suspension, ceci afin, entre autres éléments, de pouvoir proposer des solutions pour distribuer du froid à des niveaux de températures divers, compris entre quelques degrés Celsius et - 30°C par exemple.

Répartition des tâches - Positionnement de chaque équipe

Considérant les spécificités de chaque laboratoire, les tâches de chacun sont très complémentaires.

CETHIL : deux aspects très différents du problèmes sont étudiés par le CETHIL

- a) Analyse préliminaire de l'intérêt de l'emploi des FFD pour la distribution du froid : étude comparée (basée sur des données de la littérature, voire collectée sur le terrain, et une modélisation simple) des avantages et inconvénients des procédés de distribution du froid par FFD par rapport à la distribution par FFM ou par détente directe.
- b) Etude expérimentale du comportement thermique et rhéologique du coulis de glace stabilisé :
 - conception et réalisation d'une boucle expérimentale (à partir de l'expérience antérieure commune GRETH/CETHIL) ;
 - analyse des transferts en échangeur à plaques avec pour objectifs : une meilleure connaissance du comportement des FFD, de leur rhéologie et des coefficients de transferts entre le fluide et les parois au cours du stockage, puis du déstockage ;
 - reprise (en collaboration avec le GRETH) de la modélisation des écoulements et des transferts thermiques en régime turbulent dans un échangeur à plaques lisses (le cas laminaire a été étudié lors de travaux précédents).

GRETH : trois aspects du problème sont traités

- a) Optimisation des conditions opératoires : les travaux précédents ont montré que des essais de pompe (centrifuge, à vortex ou pompes de l'agro-alimentaire...) sont nécessaires pour tester la fragilité des particules. Ces tests sont effectués sur la boucle existante (FIPO).
- b) Etude du comportement du coulis de glace stabilisé sous cyclage thermique : tests d'endurance pour qualifier la résistance du produit dans des conditions de cyclage industriels (nécessité, pour cette étude de modifier la boucle existante).
- c) Modélisation de l'écoulement et des transferts thermiques : sur la base des travaux de modélisation précédents (logiciel TRIO), maintenance de l'outil pour l'usage des autres partenaires du projet (CETHIL en particulier) et développement du modèle.

CEMAGREF : conduite de deux actions différentes

- a) Caractérisation des propriétés thermophysiques du FFD : notamment détermination expérimentale des caractéristiques thermodynamiques par méthodes calorimétriques.
- b) Mesures de concentration en glace : la maîtrise de cette grandeur en temps réel est indispensable pour connaître précisément la quantité d'énergie disponible dans le fluide. Elle permet d'en définir les propriétés thermophysiques (densité, chaleur massique, conductivité thermique, viscosité) et par conséquent ses caractéristiques de transferts. L'objectif est de comparer différentes méthodes de mesure adaptables en ligne pour proposer une technique de mesure simple, fiable et peu coûteuse en vue d'une large diffusion industrielle. Deux méthodes sont en particulier à prospecter, l'une servant de référence basée sur le principe de la calorimétrie en ligne, et l'autre, promise à un développement industriel, basée sur la spectroscopie de transmission dans le proche infra rouge.

LBHP : action sur trois points

- a) Fourniture aux autres équipes du produit (gel polymère microporeux dans lequel est inséré un élément à changement de phase - eau).
- b) Développement d'un dispositif expérimental permettant la réalisation en continu de particules de MCP de tailles calibrées : actuellement, les MCP sont réalisés sous forme de blocs macroscopiques (qq cm³) puis réduits sous forme de fines particules (par broyage) ; pour un développement futur, il faut travailler sur des fluides composés de particules de MCP de tailles parfaitement bien définies. Le dispositif envisagé réalisera la polymérisation sous écoulement dans un capillaire.
- c) Réalisation et caractérisation physique des coulis de glace stabilisés (particules de MCP + liquide porteur) : recherche d'un mélange d'huile permettant d'obtenir la meilleur iso-densité avec les particules sur l'ensemble de la plage de température ; analyse du phénomène éventuel d'exsudation en fonction du nombre de cycles thermiques et du type de cisaillement imposés au coulis.

LaTEP : le laboratoire travaille sur deux aspects.

- a) Le changement de phases et en particulier le phénomène de surfusion : le caractère aléatoire des cristallisations du MCP surfondu doit être analysé, notamment en considérant l'influence de l'écoulement et du caractère cyclique des opérations. Une modélisation du phénomène est envisagée.
- b) Analyses calorimétriques complémentaires du comportement du produit : études de l'exsudation, de la conductivité du gel, pureté des produits,...



PRI 9.2 Cycles thermochimiques transport chaleur et froid à longue distance

Coordonnateur : Nathalie Mazet

Le transport de chaleur se fait classiquement sous forme de chaleur sensible ou latente (vapeur d'eau, glace surfondu), procédés fortement pénalisés par les longues distances (>10kms). Par contre, le transport d'une phase gazeuse sur de longues distances, comme le gaz naturel ou l'hydrogène est bien connu. Des réseaux similaires peuvent être utilisés pour le transport de chaleur ou de froid si on y associe des processus physico-chimiques impliquant ce gaz, processus respectivement endothermique sur le site siège de la source disponible, et exothermique sur le site utilisateur. Ces processus étant réversibles, ils impliquent le retour du gaz vers le site source, soit par un autre réseau, soit au cours dans une phase temporelle différente. Le fonctionnement d'un tel procédé est donc cyclique. Les processus envisagés dans cette étude sont le changement d'état gaz/liquide, et la sorption gaz/solide (adsorption et réaction chimique).

Une analyse thermodynamique basée sur le couplage de tels dipôles (un dipôle étant constitué de deux processus exo et endothermiques échangeant un gaz actif) a permis la caractérisation de procédés originaux (qui ont fait l'objet d'un dépôt de brevet) permettant le transport d'énergie thermique, et remplissant différentes fonctions, grâce au transport de gaz :

- production de chaleur sur le site utilisateur, à température la plus proche de la température source
- production de froid sur le site utilisateur à partir d'une chaleur incidente sur le site source
- production simultanée de froid et chaleur sur le site utilisateur
- revalorisation thermique : production de chaleur sur le site utilisateur à un niveau supérieur à celui de l'énergie incidente du site source

Ces procédés ont pour caractéristiques communes :

- ils mettent en jeu 2 dipôles associant soit un système à sorption solide-gaz et un changement d'état liquide, soit 2 sorptions solide-gaz

- les 2 dipôles sont couplés thermiquement : le réacteur à sorption de l'un des dipôles étant en contact thermique avec celui du second dipôle. Ces réacteurs fonctionnant toujours en opposition de phase (l'un endo, l'autre exothermique, puis l'inverse pendant l'autre phase du cycle), ce couplage thermique est indispensable pour l'ensemble du fonctionnement cyclique du procédé et permet d'éviter le recours à une source externe. On obtient ainsi deux réacteurs autothermes.

Le fonctionnement de tels procédés est lié essentiellement à 3 points clefs :

- la détermination de réactifs compatibles avec les niveaux de températures des productions requises par l'utilisateur (chaleur, froid), de la seule source disponible (les autres éléments étant autothermes ou régulés par le milieu ambiant)
- la conception et le fonctionnement cyclique des réacteurs autothermes
- l'incidence des pertes de charge en ligne (en conditions opératoires et en irréversibilités)

Ces points doivent être étudiés d'un point de vue énergétique, et par une analyse thermodynamique des irréversibilités. La recherche de l'équipartition des productions d'entropie dans l'ensemble du système est une voie à étudier.

En premier lieu, nous avons focalisé nos travaux sur le procédé de production de froid sur le site utilisateur à partir de chaleur incidente du site source. Concernant les couples réactifs, notre analyse a montré que l'utilisation de gaz réactifs différents dans les 2 dipôles impliquaient des conditions opératoires différentes dans chaque réacteur, plus favorables à leur fonctionnement autotherme au cours des 2 phases du cycle. Après une étude prenant en compte les contraintes opératoires liées au choix du procédé (froid à -33°C), aux réacteurs autothermes, et les performances en terme de densité énergétique et d'efficacité du procédé, nous avons sélectionné pour chacun des dipôles les systèmes solide-gaz suivants : $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$ et $\text{NiCl}_2 - \text{NH}_3$. Ils permettent la production de froid à -33°C , à partir d'une source à 200°C . Les réacteurs autothermes fonctionnent autour de 160° et 290° selon la phase du cycle. En outre, ce système autorise l'utilisation de la source à 200° pour compenser les pertes perturbant le fonctionnement autothermes des réacteurs. Enfin, ces réactifs sont classiques et ne présentent pas de difficultés expérimentales particulières.

Quant aux réacteurs, nous étudions une conception modulaire, favorisant l'intégration des 2 réacteurs. Elle prend en compte des caractéristiques de transfert de masse et de chaleur différentes des 2 milieux réactifs, et une forte différence de pression opératoire.

L'incidence énergétique des pertes de charge liée au transport de gaz a été estimée.

Une analyse approfondie des irréversibilités de l'ensemble du procédé est la priorité de la suite du projet.



PRI 10.1 Capture par adsorption de CO_2 dans des gaz de centrale thermique et leur injection en couches profondes

Coordonnateur : Daniel Tondeur

Objectif global : Evaluer l'impact énergétique d'une nouvelle filière de capture et séquestration du CO_2 . Développer les outils pour cette évaluation.

Cadrage : Les choix technologiques effectués a priori pour définir cette filière sont justifiés par une réflexion bibliographique et technologique, mais devront être confrontés à des alternatives. Ils sont les suivants :

- centrale thermique de type IGCC (Centrale à gazéification intégrée et à cycle combiné) ;
- capture par adsorption, cycle à modulation de pression ;
- injection en gisement d'hydrocarbures pour récupération améliorée, ou en couche géologique.

Equipes associées :

- Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris (R.Gicquel, P.Rivière)
- 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, Bordeaux (D.Bernard)
- Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, CNRS, Nancy (D.Tondeur, L.Luo, G.Grévilot, J.P.Corriou)

Les problèmes scientifiques à résoudre relèvent à la fois de la conception de procédé, de la mise au point éventuelle de matériaux, de la modélisation d'ensembles complexes (la centrale IGCC modifiée, le mécanisme de déplacement d'hydrocarbures lors de l'injection en gisement). Détaillons les éléments de cette démarche.

IGCC

Cette technologie de centrale en devenir a été choisie car elle représente sans doute l'évolution à terme des centrales thermique «propres» et à haut rendement, et qu'elle comporte des traitements de gaz élaborés se prêtant bien à l'intégration d'un procédé de capture, notamment du fait que les flux gazeux se trouvent sous pression.

La centrale IGCC expérimentale de Puertollano (joint venture européenne dans laquelle EDF est partenaire) est prise comme référence. Deux des équipes partenaires (CENERG-Mines et LSGC-Nancy) ont déjà travaillé sur cette centrale, et ces travaux constituent un point de départ. Le schéma de centrale doit être modifié par deux aspects principaux pour y intégrer la capture de CO₂ :

- La gazéification produit un « gaz de synthèse » constitué majoritairement de CO et de H₂. Il est nécessaire d'intégrer un procédé de conversion CO → CO₂ (gas shift) en aval de la gazéification.
- Le mélange résultant comprend, outre H₂ et CO₂ alors majoritaire, du CO restant, du N₂, de la vapeur d'eau. Il s'agit d'intégrer le procédé de capture de CO₂.

Le logiciel de simulation d'IGCC développé par le CENERG doit donc être modifié pour pouvoir y intégrer ces deux nouveaux éléments. C'est la tâche N°1, qui fera l'objet d'un travail commun CENERG-LSGC.

Conversion CO → CO₂

Il ne sera pas fait oeuvre innovante à ce sujet, car c'est un grand classique, et un modèle simple de réacteur devrait suffire. Cette conversion catalytique à la vapeur produit de l'hydrogène supplémentaire. Elle peut être conduite d'une manière autotherme mais elle correspond à une perte d'énergie potentielle (l'énergie de combustion du H₂ supplémentaire produit ne compense pas la perte de l'énergie de combustion du CO converti). La tâche ici concerne la définition d'une conversion «optimale». En effet, il n'est pas nécessaire de rechercher une conversion totale, cela dépend du taux d'abattement du CO₂ choisi. Cette tâche N°2 sera mise en place par le LSGC.

Capture du CO₂

Des études préliminaires sur les procédés à membrane (a priori intéressants) montrent qu'il n'existe pas de membrane adéquate actuellement. Nous optons donc pour l'adsorption, dont la faisabilité est certaine pour cette application. Il s'agit cependant de concevoir un procédé adapté, de choisir ou de mettre au point un matériau optimal, et de modéliser l'ensemble pour intégrer la simulation avec le logiciel CENERG. Cette tâche N°3 est centrale dans le projet et se décompose en sous-tâches.

3A : recherche/mise au point/caractérisation d'adsorbants (charbon actif): IMP Perpignan

3B : conception/modélisation d'un procédé d'adsorption (de type PSA) : LSGC-Nancy

3C : intégration de la capture dans le schéma IGCC et liaison logicielle : CENERG et LSGC

Conditionnement, stockage et transport du CO₂

Ces opérations ne seront pas modélisées dans le détail, mais prises en compte dans le bilan énergétique.

Tâche N°4 : LEMTA-Nancy

Injection en gisement d'hydrocarbure

Cette option paraît l'une des plus intéressantes et est étudiée et pratiquée aux Etats-Unis dans un contexte différent (le CO₂ utilisé est issu d'un gisement de ce gaz, et non récupéré dans des centrales). Nous travaillerons en détail sur l'option gisement de pétrole. Le LTMP- Nancy a une expérience de modélisation de la thermodynamique de dissolution de gaz dans les fluides pétroliers et des mécanismes de déplacement. Il assurera cette tâche N°5 dans une optique d'évaluation de l'énergie récupérée au regard du CO₂ séquestré (sachant qu'une partie du CO₂ ressort avec le pétrole).

Alternatives de séquestration

La séquestration en couches géologiques fait l'objet de nombreuses études de par le monde. Une synthèse bibliographique de ces études sera effectuée, et on essayera d'en dégager les aspects énergétiques. Tâche N°6 : sous l'égide de l'ICMC-Bordeaux,

Intégration énergétique

L'objectif global du projet étant l'impact énergétique de la capture-séquestration de CO₂, on mettra en place les outils de mesure correspondants, qui conduiront par exemple à un coût en kWh de la mole de CO₂ capturée/séquestrée, en fonction des options et des réglages retenus de la chaîne de procédé dans son ensemble. En ce qui concerne les coûts de la capture proprement dite, liée au fonctionnement de l'IGCC, ils résulteront des simulations et calculs globaux faits sur l'installation. La mise en place de cette évaluation énergétique se fera sous l'égide du LEMTA-Nancy, en liaison avec les autres acteurs du projet.

Liens avec d'autres actions du Programme

Au sein du GAT Combustion et CO₂, des discussions auront lieu sur l'impact du procédé de capture et de la composition des gaz qui en sont issus, sur les performances de la turbine à gaz de l'IGCC,. Pour des raisons d'utilisation optimale de la pression, le procédé d'adsorption envisagé a en effet vocation à se placer juste en amont de la chambre de combustion.

Un lien sera établi avec le GAT Socio-Economie de l'Energie afin d'intégrer ce travail dans une réflexion sociétale plus générale.



GAT 11a Nucléaire du futur

Coordonnateur : J.M. Loiseaux

(Rédaction : J.M. Loiseaux Coordination, S. David, D. Heuer, M. Allibert, S. Sanchez, C. Simon)

Membres du GAT 11

Allibert M., Carré F., Coutures J.P., David S., Doubre H., Garzenne C., Gaune-Escard M, C., Gorse D.,
Haas B., Heuer D., Loiseaux J.M., Picard G., Taxil P., Turc P., Sanchez S., Simon C.,
CNRS 8 chimistes ou physico-chimistes matériaux 6 physiciens neutronique, physique des réacteurs
CEA 1 R&D Réacteurs innovants, physique ou cycle)
EDF1 R&D physique des réacteurs, physique (cycle).

Contexte et objectifs du GAT 11a «Nucléaire du futur»

Le contexte

Gestion des déchets et futur du nucléaire sont des problématiques étroitement imbriquées. Quelles sont les voies pour un nucléaire du futur durable et significatif au niveau mondial ? Le CEA, EDF et le CNRS ont déjà largement entamé ces études et ressentent l'urgence de programmes de recherches affichés sur les systèmes innovants. Création de GEDEPEON (Gestion des DEchets et Production d'Energie par des Options Nouvelles). L'initiative américaine « Génération IV », visant à définir un réacteur innovant à déployer d'ici 2030, va dans le même sens.

1. Objectifs du Groupe d'Analyse Thématique du Nucléaire du Futur

- 1- Situer la demande d'énergie primaire à l'échelle 2050 et estimer les possibilités et limites de l'Energie Nucléaire à cette échéance (niveau mondial, niveau européen). Le nucléaire peut-il être une source d'énergie significative en 2050 ?
- 2- Identifier les voies de production d'énergie primaire par un nucléaire durable à l'échéance 2050.
- 3- Sélectionner les plus prometteuses au regard de critères à définir. Faire un effort sur la présentation et l'argumentation pour s'adapter au cadre général du programme énergie du CNRS.
- 4- Identifier les verrous scientifiques et technologiques des options retenues. Définir des projets en relation avec ceux du 6^{ème} PCRD.
- 5- Contribuer à un document de synthèse sur la génération d'énergie avec les autres GAT.

2. Etat d'avancement des travaux du GAT 11

Le GAT 11 a commencé ses travaux à l'automne 2002 et a tenu deux réunions d'une journée à Paris, la prochaine étant programmée pour le 7 janvier 2003.

La mise en place du GAT a été réalisée sans difficulté majeure. Les travaux de discussion et d'élaboration se sont déroulés de façon très conviviale, dans une ambiance interactive et très motivée.

3. Quelques résultats des travaux du GAT11 (objectifs 1 à 3).

- La demande mondiale d'énergie primaire à l'échelle de 2050 (environ deux fois la consommation actuelle) de même que la nécessaire limitation des rejets de CO₂, met en évidence le besoin impérieux et urgent de développer de très importantes sources d'énergie (chiffrage en cours).
- La production d'énergie nucléaire peut être durable à un niveau largement plus élevé qu'actuellement si l'on prend les voies régénératrices ou surgénératrices de matière fissile.
- Les options les plus prometteuses, avec leurs qualités intrinsèques mais aussi leurs potentialités pour un développement important d'ici 2050, sont identifiées et en cours de comparaison.. Les limites du nucléaire à cette échéance (2050) sont estimées à 10 fois la production actuelle ce qui correspondrait à environ 25% de la production d'énergie primaire.
- Les interactions avec les autres GAT apparaissant nécessaires dès à présent sont:
 - GAT s'occupant des nouveaux moyens de production d'énergies renouvelables.
 - GAT s'occupant de l'utilisation de chaleur en co-génération.
 - GAT s'occupant des aspects sociologiques .

