



Colloque Energie

16 - 18 novembre 2009

Quelques Enjeux et défis de Recherche en Energie

Résumés des travaux des ateliers
du 7ème Colloque du Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS

avec le concours de

Polytech, Université de Nantes



POLYTECH
NANTES

<http://energie.cnrs.fr/colloque2009>

SOMMAIRE

| | |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| AVANT PROPOS | 1 |
| PROGRAMME | 4 |
| Lundi 16 novembre..... | 4 |
| Mardi 17 novembre | 5 |
| Mercredi 18 novembre | 6 |
| L'Hydrogène et la Pile à Combustible | 9 |
| L'Energie Solaire : PV & Concentré | 28 |
| La Capture et le Stockage du CO₂ | 58 |
| La Socio-économie de l'Energie | 67 |
| Les contraintes sur les Agro-Carburants | 74 |
| La place du Nucléaire en 2050 | 77 |



Quelques enjeux et défis de recherche en Energie

Ce document complète la brochure de présentation générale du colloque qui comporte en particulier le programme, la liste des projets et les résumés présentant leur état d'avancement, à ce jour. En effet, cette année, le colloque sera aussi l'occasion de mener des débats sur des sujets spécifiques qui ont été préparés grâce au travail d'un certain nombre de groupes de réflexion mis en place :

- ▀ dès 2008 un premier groupe a abordé, dans le cadre du GAT « nucléaire », la prospective sur l'évolution possible des sources d'énergie et sur la place du **nucléaire** en 2050. Un second, plus transverse, a eu pour mission d'analyser les enjeux et les contraintes concernant les **agro-carburants**.
- ▀ depuis juin 2009, et plus spécifiquement en vue de la préparation du colloque, quatre autres groupes de travail, animés par une personnalité extérieure au CNRS, se sont vus confier un exercice de réflexion portant sur la nouvelle stratégie à mettre en œuvre sur 4 domaines de recherche particuliers : l'hydrogène, le solaire, la capture/séquestration du CO₂ et la socio-économie de l'énergie. Ces dernières contributions prennent tout leur sens, dans le cadre de la récente mise en place de l'Alliance ANCRE.

Les réflexions de ces quatre derniers groupes de travail feront l'objet des **ateliers** qui démarreront lundi en fin d'après-midi (17h45) et se poursuivront mardi. Celles concernant les agro-carburants et le nucléaire seront présentées mercredi en début de matinée.

Les rapports des travaux de chaque groupe sont regroupés dans le présent document.

Le Nucléaire

L'étude présentée est le résultat d'une réflexion menée sur le paysage énergétique mondial de 2050. Il ne s'agit pas d'un travail de prévision, mais de la construction transparente de différents mix énergétiques possibles en 2050, basée sur des données et des hypothèses globales complètement explicitées (consommation d'énergie, répartition mondiale, émission de CO₂). L'ambition première est de proposer une base de discussion solide et étayée. La démarche se veut donc avant tout transparente : chaque étape du cheminement est décrite dans sa totalité. Les résultats permettent de dégager des points de repère et d'apporter des informations quantitatives sur différents types de mix énergétiques en 2050 : au niveau mondial, par type de besoin (transport, industrie, résidentiel/tertiaire, électricité), par type de population, ou par zone géographique. Cette étude aboutit à une estimation de la demande d'énergie nucléaire en 2050, qui fait l'objet d'une description particulière.

Les Agro-carburants

Après l'engouement initial conduisant à considérer les agro-carburants (de Génération1) comme une ressource énergétique renouvelable, des doutes sont apparus sur le gain réel en émissions de gaz à effet de serre (EGES) ainsi que sur le gain énergétique réel. La polémique s'est ensuite installée à propos de la concurrence avec les cultures vivrières. Il s'en est suivi une situation très confuse dans l'opinion publique, mais aussi dans le monde scientifique et cela a conduit à missionner un groupe de travail interne au CNRS pour répondre à la question suivante :

« Qu'en est-il de la pertinence de développer la voie des agro-carburants, en termes de solution partielle à une autonomie énergétique, en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en termes d'incidence sur l'alimentation de l'humanité ? »

Les ateliers

Nous avons souhaité faire en sorte que le colloque constitue une étape vers des partenariats plus forts entre le CNRS et les autres acteurs nationaux de la recherche énergétique et, à cette fin, nous avons demandé, en juin, à des groupes de travail de préparer un exercice de réflexion en ce sens pour quatre thématiques :

- l'hydrogène,
- le solaire,
- la capture/séquestration du CO₂,
- la socio-économie de l'énergie.

Chacun des quatre groupes de travail, aussi mixte que possible, animé par une personnalité extérieure au CNRS, assistée d'une équipe de collaborateurs, a eu pour mission de décanter les problématiques, notamment sous les angles suivants :

- Etat de l'art dans le monde, scientifique et technologique
- Principaux acteurs mondiaux, académiques et industriels, et leurs atouts
- Structure et forces/faiblesses de la recherche en France
- Les défis les plus critiques à relever
- Pistes de partenariat à privilégier

Mentionnons enfin, qu'un dernier groupe de travail transverse, a été chargé d'établir un descriptif opérationnel de la panoplie des outils de programmation existants, afin d'alimenter la réflexion d'ensemble : il animera la table ronde prévue à cet effet lundi après-midi (pas de contribution écrite).

Les ateliers, se veulent être un lieu de débat participatif à partir, d'une part, des réflexions des groupes de travail et, d'autre part, des éclairages que donneront les travaux de recherche en cours dans le cadre du Programme Energie. Il en est de même des contributions sur le nucléaire et sur les agro-carburants.

Les conclusions du colloque intégreront bien évidemment les principales contributions issues des débats.

La Direction du Programme exprime ici ses remerciements les plus sincères à l'égard de l'ensemble des personnes qui ont bien voulu accepter de donner un peu de leur temps pour contribuer à ces travaux.

PROGRAMME

Lundi 16 novembre

Bilan des projets portant sur l'efficacité énergétique

| | | | | |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9h00 | ACCUEIL - INSCRIPTIONS Rue, bat. Ireste | | | |
| 10h30 | Ouverture du Congrès Rue, bat. Ireste | | | |
| 11h00 | Conférence plénière " Vecteur électricité : enjeux et défis de recherche" - Pascal TERRIEN - EDF Président de séance : J.B. SAULNIER - Directeur du PIE du CNRS Amphi1, bat Ireste | | | |
| 11h45 | PIE2-Bilan des projets 2007 et 2008 sur le thème de l'efficacité énergétique Président de séance : J.P. DUMAS - Université de Pau Amphi1, bat Ireste | | | |
| 13h00 | Déjeuner Rue, bat. Ireste | | | |
| 14h30 | PIE2-Bilan des projets 2007 et 2008 sur le thème de l'efficacité énergétique Président de séance : J.P. ROGNON - ECL Amphi1, bat Ireste | | | |
| 15h45 | Pause café Rue, bat. Ireste | | | |
| 16h00 | PIE2-Bilan des projets 2007 et 2008 sur le thème de l'efficacité énergétique Président de séance : G. COGNET - INPG Amphi1, bat Ireste | | | |
| 17h00 | Les outils de programmation en énergie Daniel CLEMENT - ADEME, Bernard MULTON - CNRS, Ludovic VALADIER - ANR, Thomas SENNELIER - OSEO, Gérard COGNET - CNRS Président de séance : M. LÉBOUCHE - Université de Nancy Amphi1, bat Ireste | | | |
| 17h45 18h45 | Introduction Atelier 1 - session 1 H2 et Pile Président de séance : G. POURCELLY - Université de Montpellier Amphi1, bat Ireste | Introduction Atelier 2 - session 1 Solaire PV & Concentré Président de séance : G. FLAMANT - PROMES CNRS Salle Nautilus, bat IHT | Introduction Atelier 3 - session 1 CO2 Président de séance : J.M. MOST - PIE du CNRS Amphi2, bat Ireste | Introduction Atelier 4 - session 1 Socio-économie Président de séance : P. MATARASSO - PIE du CNRS Salle Capitaine Némó, bat IHT |
| 19h30 | Réception à l'Hôtel de Ville de Nantes | | | |

Mardi 17 novembre

Ateliers et perspectives

| | | | | |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8h45 | Accueil | | | |
| 9h00 | Atelier 1 - session 2 H2 et Pile Président de séance : P. BEUZIT- Alphéa Amphi1, bat Ireste | Atelier 2 - session 2 Solaire PV & Concentré Président de séance : Y. FAURE-MILLER - PIE du CNRS Salle Nautilus, bat IHT | Atelier 3 - session 2 CO2 Président de séance : C. FOUILLAC - BRGM Amphi2, bat Ireste | Atelier 4 - session 2 Socio-économie Président de séance : J.P. BIRAT - Arcelor- Mital Salle Capitaine Némo, bat IHT |
| 11h00 | Pause café Rue, bat. Ireste | | | |
| 11h20 | Atelier 1 - session 3 H2 et Pile Amphi1, bat Ireste | Atelier 2 - session 3 Solaire PV & Concentré Salle Nautilus, bat IHT | Atelier 3 - session 3 CO2 Amphi2, bat Ireste | Atelier 4 - session 3 Socio-économie Salle Capitaine Némo, bat IHT |
| 13h00 | Déjeuner Rue, bat. Ireste | | | |
| 14h30 15h30 | PIE2-Bilan des projets 2007 et 2008 sur le thème de l'efficacité énergétique Président de séance : C. GOUPIL - ENSICAEN - CRISMAT-CNRS Amphi1, bat Ireste | | | |
| 14h30 16h30 | Session Affiches - PIE2 - tous les projets Rue, bat Ireste | | | |
| 16h00 | Pause café Rue, bat. Ireste | | | |
| 16h30 18h30 | Restitutions et conclusions des quatre ateliers : H2 et Pile, Solaire PV & Concentré, CO2 et Socio-économie session 4 Président de séance : H. PEERHOSSAINI - PIE du CNRS Amphi1, bat Ireste | | | |
| 20h30 | Diner de Gala sur l'Erdre | | | |

Mercredi 18 novembre

Conférences et débats

8h45

Accueil

9h00

Les contraintes sur les agro-carburants - Jean-Marie LOISEAUX - PIE du CNRS
Président de séance : E. FAVRE - LSGC - CNRS
Amphi1, bat Ireste

10h10

La place du nucléaire en 2050 - Sylvain DAVID, Sandra BOUNEAU - IPN - CNRS
Président de séance : H. DOUBRE - CSNSM - CNRS
Amphi1, bat Ireste

11h15

Pause café
Rue, bat Irest

11h30

Bilan et perspectives

12h15

Séance de clôture
Jean-Bernard SAULNIER et Patrick LE QUERE - Directeurs du PIE du CNRS

12h30

Déjeuner
Rue, bat Ireste

Participants aux groupes de travail des différents ateliers

| Groupe | H ₂ | Solaire | CO ₂ | Socio-éco | Transverse |
|---------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| Animateur | Pierre Beuzit (Alphéa) | Y. Faure-Miller (CNRS) | Christian Fouillac (BRGM) | Jean-Pierre Birat (Arcelor-Mittal) | Daniel Clément (ADEME) |
| Adjoint CNRS | Gérald Pourcelly | Gilles Flamant | Eric Favre | Jean-Charles Hourcade | Bernard Multon |
| Membres CNRS | Michel Latroche Deborah Jones Jean-Claude Grenier | Jean-François Guillemolles Jean-michel Nunzi Christine Dagon-Lartigau | Mireille Bruschi Iskender Gökalp Yvan Faure-Miller | Patrick Criqui Jean-Marie Loiseaux | Gérard Cognet |
| IFP | François Ropital | John Lynch | Alain-Yves Huc | Guy Maisonnier | |
| CEA | Florence Lefèbvre-Joud | Philippe Malbranche | | | |
| ADEME | Loïc Antoine | Yvonnick Durand Céline Coulaud | Stéphanie Arnoux Nathalie Thybaud | Michel Gioria | |
| EDF | Ludmila Gautier | Robert Soler | Etienne Decossin | Pascal Terrien | |
| ANR | | | | | Ludovic Valadier |
| OSEO | | | | | Marc Dufau Thomas Sennelier |

Membres des groupes de réflexion

« Les contraintes sur les agro-carburants »

Mireille Bruschi - CNRS

Yvan Faure-Miller - CNRS

Jean-Marie Loiseaux - CNRS

Jean-Michel Most - CNRS

Hassan Peerhossaini - CNRS

« Construction d'un monde énergétique de 2050 »

Sandra Bouneau - CNRS

Sylvain David - CNRS

Jean-Marie Loiseaux - CNRS

Olivier Méplan - CNRS



L'Hydrogène et la Pile à Combustible

Afin d'alimenter la réflexion sur les perspectives et sur la nécessaire structuration de la recherche et d'optimiser la synergie entre les acteurs de la recherche et ceux du monde industriel dans le domaine de « l'énergie bas carbone », la direction du Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS (PIE) a sélectionné 4 thèmes (i) : Hydrogène et piles à combustible ; (ii) : Solaire photovoltaïque et concentré ; (iii) : Combustion, capture / séquestration de CO₂ ; (iv) : Socio-économie de l'énergie.

Chacun de ces thèmes a été abordé par un groupe de travail animé par une personnalité extérieure au CNRS (1). Il s'agissait de répondre aux cinq objectifs suivants :

- ▶ Etablir une analyse de l'état de l'art à l'échelle internationale (scientifique et technologique) ;
- ▶ Identifier les principaux acteurs académiques et industriels ainsi que les atouts structurels dont ils bénéficient ;
- ▶ Analyser la structure de recherche en France dans le domaine concerné et identifier ses forces et ses faiblesses ;
- ▶ Mettre en évidence les défis les plus critiques à relever en les hiérarchisant de manière argumentée ;
- ▶ Déboucher sur des pistes de partenariat à privilégier, incluant en particulier la culture de la confiance et des complémentarités, le principe d'une consultation pérenne etc...

Ce qui suit est à prendre comme un document de travail destiné à alimenter la réflexion des participants au colloque Energie de Nantes.

1. Introduction

Aujourd'hui, nos besoins énergétiques sont largement couverts par les énergies fossiles. La prise de conscience par nos sociétés modernes de l'impact des émissions de CO₂ sur le réchauffement de la planète et la pénurie annoncée en énergie fossile nous a conduit à rechercher des énergies alternatives et moins polluantes. L'hydrogène est considéré aujourd'hui comme un vecteur énergétique potentiellement attractif pour l'application transport et comme une option technologique offrant de nouvelles perspectives de valorisation des énergies intermittentes (solaire, éolien, etc.). Couplé à une pile à combustible, sa combustion électrochimique est réalisée avec un excellent rendement tout en ne produisant que de la vapeur d'eau. Cependant, de nombreux verrous technologiques restent à lever. Quel que soit le mode de production de l'hydrogène (par thermolyse, par électrolyse,...), quelle que soit l'utilisation du gaz (pile à combustible, moteur thermique,...), quelle que soit l'ampleur du développement économique (de la simple utilisation ponctuelle au développement d'une hypothétique civilisation de l'hydrogène), il faudra résoudre les problèmes posés par la production, la purification, le stockage et le transport de ce gaz, et bien évidemment relever des défis technologiques sur la pile à combustible (PAC).

Les PAC sont considérées comme un moyen de production décentralisée prometteur à plusieurs titres : (i) : flexibilité du combustible qui peut être utilisé (en dehors du gaz naturel et hydrogène, possibilité d'envisager des combustibles d'origine renouvelable, tels que le biogaz ou les biocombustibles liquides), (ii) : flexibilité de la technologie (basse et haute températures) avec des avantages et des inconvénients distincts, (iii) : modularité en puissance ouvrant de nombreuses perspectives d'applications (mobile, transport, stationnaire résidentiel, tertiaire et industriel), (iv) : avec un rendement électrique élevé (> 50 %) sur une large plage de modulation de puissance.

En ce qui concerne les piles à combustible à basse température, si le seul combustible acceptable est H₂ pur (contenant au maximum quelques dizaines de ppm de CO pour éviter l'empoisonnement des catalyseurs à base de platine des piles PEMFC), l'utilisation du carburant méthanol (DMFC) conduit à des performances plus faibles. Les piles à conduction hydroxyle (SAMFC) à 200°C acceptent des teneurs de 1% en CO, alors

que les piles à carbonates fondus (MCFC) peuvent utiliser des mélanges CO/H₂ issus du vapo-reformage d'un hydrocarbure ou de la gazéification de charbons et de la biomasse. Dans les piles SOFC, l'alimentation directe en hydrocarbure (e.g. gaz naturel, biogaz) est possible, la conversion en hydrogène s'effectuant au contact des électrodes (reformage interne). A ce jour, la tendance est d'augmenter la température de fonctionnement des PEMFC et de diminuer celle des SOFC. Ainsi des électrolytes polymères mixtes organiques-inorganiques sont étudiés dans la gamme 150-200°C alors que des céramiques à conduction protonique (PCFC) permettent d'envisager un fonctionnement vers 400-500°C. Ce qui suit a pour objectif de replacer ces recherches dans le contexte national et international, d'une part en identifiant des verrous technologiques et d'autre part en envisageant une structuration de la recherche non pas au niveau *intra* organismes institutionnels mais plutôt de façon à les mettre en synergie.

2. Le contexte international de la recherche PAC et Hydrogène

En Europe, la mise en place de différents programmes cadres a vu une augmentation croissante des ressources allouées aux programmes "Hydrogène et Piles à Combustible" : 8 M€ pour le 2ème PCRD (1986-1990), 145 M€ pour PCRD5 (1999-2002) et pour PCRD6 environ 320 M€, financement ne prenant pas en compte la contribution industrielle. Actuellement, pour le PCRD7, l'essentiel des financements des projets est réalisé dans le cadre d'une Joint Technology Initiative (JTI) au travers de la plate-forme "Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking" (FCH-JU). Dans ce nouveau contexte, la Commission Européenne contribuera au programme à hauteur de 470 M€ tandis que 470 M€ proviendront du secteur privé. La plateforme est structurée en quatre domaines d'application :

- ▶ Transport et Infrastructure
- ▶ Production d'hydrogène et Distribution
- ▶ Stationnaire et Co-génération
- ▶ Marchés précoces.

La répartition sera environ respectivement 144-162 M€, 45-54 M€, 154-167 M€ et 54-63 M€ sur l'ensemble de la période 2008-2013. Les applications sont ouvertes aux technologies PEMFC, MCFC et SOFC qui se distribuent sur les domaines 1, 3 et 4.

La feuille de route de la plateforme FCH-JU est contenue dans le "Multi-Annual Implementation Plan" (MAIP, version finale mai 2009), basé sur les documents "Hydrogen and Fuel Cells – A Vision for our Future" (2003), "Strategic Research Agenda" (2005), la Stratégie de Déploiement (2005) et l'Implémentation Plan (2006) de la "Hydrogen and Fuel Cells Technology Platform" du 6ème PCRD. Les domaines prioritaires ont été identifiés par des groupes de travail sous les auspices de la Commission Européenne comportant des représentants de l'industrie et des organismes de recherche. La mise en place du FCH-JU contribue à une focalisation et une coordination qui avaient manquées lors des Programmes Cadres précédents. Cette difficulté de mettre en place des programmes focalisés est due à la dispersion des efforts de recherches au sein des partenaires de l'Union Européenne. Le FCH-JU doit permettre de surmonter cette faiblesse.

Au niveau des états membres, l'**Allemagne**, le **Royaume Uni** et le **Danemark** ont mis en place des programmes nationaux de recherche sur les piles à combustible. Le plus important d'entre eux étant incontestablement le programme allemand "Fuel Cell Technology Innovation" (NIP), avec un financement de 500 M€ jusqu'en 2015 pour la recherche, le développement et les démonstrations, niveau équivalent à la participation de l'Europe dans la FCH-JU. Par ailleurs, le programme allemand consacre 1/3 des financements au développement des SOFC pour les applications stationnaires en co-génération.

Le NIP est organisé d'une manière similaire à celle de la FCH-JU, avec quatre domaines: transport et infrastructure hydrogène (54% du budget total), applications domestiques, applications industrielles, et marchés de niche. L'industrie et la recherche en Allemagne occupent une position de pointe en Europe dans la technologie Hydrogène et Piles à Combustible, ceci grâce aux financements au cours de décennies antérieures en particulier dans le domaine des composants et des systèmes. Le programme actuel vise à consolider cette avance et à favoriser le transfert technologique. La forte présence de l'industrie chimique en Allemagne a permis de développer un savoir-faire au niveau des matériaux et s'appuie sur un socle de propriété industrielle qui la place en position très favorable pour les années à venir.

Dans ce contexte de forte implication industrielle, Daimler, EnBW, Linde, OMV, Shell, Total, Vattenfall and the NOW GmbH National Organisation Hydrogen and Fuel Cell Technology ont signé en septembre 2009 un Memorandum of Understanding "H₂ Mobility" pour évaluer les différentes options conduisant à un accroissement substantiel des stations de distribution d'hydrogène pour la fin de 2011. A l'heure actuelle, la

distribution se fait au travers de 30 stations, dont sept sont intégrées dans des stations services conventionnelles.

Au **Royaume Uni**, le gouvernement a publié un Programme Cadre Stratégique pour les activités liées à l'hydrogène, qui comprend un volet financement de 15 M£ sur quatre ans sur une large programme de démonstration. Les projets peuvent aussi être financés par le Department of Trade and Industry: 2-3 M£ par an pour les applications stationnaires et transport, et par l'Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) qui soutient la recherche universitaire en particulier à travers l'initiative "SUPERGEN" (Sustainable Power Generation and Supply). Le consortium SUPERGEN Fuel Cells comprend l'Imperial College (Université de Londres), les Universités de Newcastle, Nottingham, St Andrews, Ceres Power Ltd, Defence Science and Technology Laboratory, Johnson Matthey plc et Rolls-Royce Fuel Cell Systems Ltd., et bénéficie d'un financement de 2,5 M£ sur quatre ans.

Le gouvernement **danois** considère les énergies renouvelables comme l'un des domaines clefs pour la croissance économique. Le Danish Partnership for Hydrogen and Fuel Cells coordonné par la Confédération des Industries Danoises, rassemble les acteurs industriels et académiques sur des projets financés par le gouvernement à la hauteur de 3 M€/an.

En 2003 aux **Etats-Unis**, l'Hydrogen Fuel Initiative lancée sous la présidence de G.W.Bush a mobilisé \$1,2 milliards sur la technologie pile à combustible et l'hydrogène. Avec une forte coordination, une stricte procédure de revue annuelle et l'obligation de rendre public les résultats de la recherche financée sur les fonds publics, le programme US est très focalisé et jouit d'une forte visibilité. En 2010, la proposition du Secrétaire à l'Energie de réduire substantiellement le budget à 64 M\$ (en raison du retard pris dans le développement de l'infrastructure) n'a pas été suivie par le Congrès, qui a rétabli le financement à 174 M\$, et maintient l'effort de l'administration B.Obama au même niveau que celle de Bush. Le programme du Department of Energy implique des partenariats industriels tels que FreedomCAR et Fuel Partnership regroupant le U.S. Council for Automotive Research (Ford Motor Company, General Motors Corporation, Chrysler LLC), les compagnies pétrolières (BP America, Chevron, ConocoPhillips, ExxonMobil et Shell) et les énergéticiens (Southern California Edison et DTE Energy). Côté production d'hydrogène par électrolyse à haute température, ce programme est lié au programme nucléaire avec l'INL (Idaho National Laboratory et le MIT comme acteurs principaux.

Le **Japon** a été un des premiers pays à mettre en place une coordination des efforts de recherche au niveau académique et industriel dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustible et une feuille de route pour les applications stationnaire et transport. Ces deux domaines impliquent les PEMFC avec une forte recherche en interne chez les constructeurs automobiles Toyota, Nissan et Honda, ainsi que dans les centres tels que le The Polymer Electrolyte Fuel Cell Cutting-Edge Research Center (FC-Cubic), centre de recherche né à l'initiative du Ministère de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie et NEDO (Industrial Technology Development Organisation). NEDO développe un programme sur le développement de la technologie PEMFC et finance divers projets tel que le projet Nanomaterials for High Performance Fuel Cells for Transport Applications (Université de Yamanashi).

3. Le Contexte National

Depuis 2009, l'**Agence Nationale de la Recherche** a mis en place le programme H-PAC (2009-2011), ce programme fait suite au programme PAN-H (2005-2008) et couvre les mêmes domaines. Ces programmes comme tous les programmes de l'ANR fonctionnent sur le principe de réponses à des appels d'offre. De 2005 à 2008, le montant global du financement a été de l'ordre de 84 M€ sur l'ensemble des technologies hydrogène, PEMFC et SOFC. La part dédiée aux recherches sur les PEMFC représentent environ 9,3 M€ en 2005, 6,8 M€ en 2006, 1,2 M€ en 2007 et 3,7 M€ en 2008. Les projets associent généralement les acteurs industriels de la filière tels que Axane, Air Liquide, PCA, Helion et des PME Paxitech, N-GHY, CETH, Auer etc..., des instituts de recherche, les laboratoires du CEA et du CNRS. Dans ce cadre :

- En 2005, les PEMFC ont représenté 55 % des financements ANR PAN-H, les SOFC et PCFC 12 %, la production d'hydrogène par électrolyse 11 % ;
- En 2006, la production d'hydrogène est montée à 26 % alors que les SOFC ne figuraient plus dans l'AAP ;
- En 2007 et 2008, le programme PAN-H a vu son montant divisé par 3, les SOFC et PCFC ne figuraient toujours pas tandis que la production d'hydrogène par électrolyse continuait de progresser ;
- En 2009, malgré un niveau de financement très bas, les SOFC et PCFC réapparaissent pour la co-génération stationnaire.

L'ADEME soutient depuis 1999 des projets sur le thème général des piles à combustible et a participé en janvier 2009 avec l'Association Française de l'Hydrogène à la création de la Plateforme Française HyPac destinée à promouvoir les actions sur l'hydrogène et les piles à combustible. L'ADEME a récemment financé une étude dénommée FILOSOFIE sur « L'évaluation de la filière SOFC en France » en liaison avec Alpeha Hydrogène. Les conclusions de FILOSOFIE sont en partie reprises en § 4.b.3.

OSEO doit financer à hauteur de 67 M€ le programme H2E coordonné par Air Liquide. L'investissement global est de 200 M€. Le programme regroupe autour d'Air Liquide des industriels tels qu'Axane, Helion, Alfa Laval Vicarb, Imphy Alloys, Raigi, Alphaplast, ainsi que des organismes ou instituts : CEA, INERIS, IPREM, et des laboratoires du CNRS.

Les laboratoires du CNRS ayant une forte activité dans le domaine des piles à combustible sont structurés au sein du GdR PACTE depuis 2006, qui regroupe les activités SOFC et PEMFC autour de la thématique "cœur de pile". Le GDR associe les groupes CNRS à ceux des autres communautés de chercheurs (CEA) et industriels (EDF, GDF-SUEZ, Saint GOBAIN, HELION). Le CNRS a par ailleurs mis en place au sein du Programme Interdisciplinaire Energie 2 un groupe d'analyse thématique sur les système PAC impliquant chercheurs des différents organismes (CEA) des agences (ADEME, AFH2), des instituts ou centres de recherche (EIFER, INRETS), industriels (PCA, Renault, HELION, VALEO). Un certain nombre de projets exploratoires et de projets de recherche contractualisés sont soutenus à la suite de réponses à des appels d'offre. La communauté « Systèmes Piles » s'est associée au GdR PACTE dans la demande de labellisation du nouveau GdR PACS : « Piles A Combustible, Systèmes ».

Récemment, sous l'impulsion du PIE-2, la communauté CNRS concernée par une production économe en CO₂, le stockage et la purification d'hydrogène s'est également structurée dans un GdR dénommé ACTHYF (cf § 4.C.2).

4. Etat de l'art, défis, forces et faiblesses, partenariats

Piles à Combustible basse température. (PEMFC)

1. Etat de l'art

La plupart des efforts de recherche actuels sur les nouveaux matériaux pour pile à combustible basse température (PEMFC) visent à l'augmentation des performances (augmentation des rendements, augmentation des puissances spécifiques, diminution des quantités de platine, diminution de l'encombrement et de la masse), l'augmentation des stabilités mécanique, thermique et électrochimique, la diminution des coûts, l'élargissement du domaine de température au-delà de la plage de température 20-90°C, aussi bien pour les applications dans la gamme de puissance moyennes 50 W – 10 kW destinés à la production d'énergie délocalisée stationnaire ou mobile, que les puissances plus élevées 20 – 80 kW pour les applications automobile, ou >200 kW pour le résidentiel collectif ou les applications industrielles.

Un fonctionnement à température plus élevée permettrait de répondre à un certain nombre de problèmes technologiques propres non seulement au cœur de piles mais aussi relatifs au système :

- ▀ la sensibilité au CO à basse température, il est nécessaire de mettre en œuvre des étapes de purification complexes et coûteuses. La tolérance au CO atteint 1% pour des températures > 160°C, ce qui permettrait d'utiliser l'hydrogène obtenu à partir du reformage du gaz naturel ou d'un biofuel.
- ▀ Une température plus élevée augmente les vitesses des réactions aux électrodes, optimise les performances et le rendement de la pile, permet une meilleure récupération de la chaleur, et produit une chaleur de meilleure qualité dans le cas de la co-génération pour les applications résidentielles.
- ▀ Pour l'application véhicule, l'augmentation de la température permet de s'affranchir d'un système de refroidissement et d'évacuation de la chaleur complexe à mettre en œuvre et encombrant.

Les membranes ionomères perfluorosulfonées constituent à l'heure actuelle le matériau de choix dans la technologie standard des PAC à membranes. Elles présentent de très bonnes propriétés de conduction protonique et des progrès récents dans le développement de polymères perfluorosulfonés dits à "chaîne courte" a permis une augmentation de la capacité d'échange ionique et d'améliorer les propriétés de conduction sur toute la gamme de température. Cependant, ce type de membrane souffre de limitations : sa stabilité chimique dans certaines conditions de fonctionnement d'une pile à combustible est limitée et la conductivité diminue d'un ordre de grandeur lorsque le taux d'humidité relative passe de 80 à 30 %, ce qui signifie que le maintien des performances de la pile à combustible nécessite la mise en place d'un dispositif complexe d'hydratation et de gestion de l'eau dans le système. Si des travaux récents permettent de

modérer la dégradation chimique des membranes perfluorosulfonées (stabilisation des groupes réactifs de bout des chaînes polymère, incorporation de "pièges à radicaux" dans la membrane ou des électrodes), le problème de sa stabilité mécanique reste à résoudre. En effet, la nécessité de maintenir un niveau élevé d'humidification des réactifs est une source d'instabilité. Les variations de volume considérables entre l'état hydraté et l'état sec lors du dessèchement des membranes peuvent être à l'origine de fatigues mécaniques locales occasionnant la rupture de la membrane et la défaillance de l'ensemble du système.

Du côté des catalyseurs pour activer les réactions aux électrodes le platine est incontournable, notamment à la cathode où la réaction de réduction de l'oxygène (de l'air) est difficile à basse température. L'ajout d'un second, voire d'un troisième métal, est une voie de recherche prometteuse permettant d'augmenter l'activité catalytique et de diminuer la quantité de platine utilisée. Les problèmes liés à l'instabilité des électrocatalyseurs de type Pt supporté sur carbone lors d'un fonctionnement à tension de cellule élevée ont conduit à des travaux récents sur la stabilisation à la fois du catalyseur (alliages, structure cœur-coquille etc...) et de son support (graphitisation du carbone, carbone dopé par des hétéro-atomes, supports alternatifs au carbone etc...). A l'heure actuelle, des avancées considérables ont été réalisées pour augmenter la durabilité des assemblages membrane – électrodes (AME), pour diminuer leur coût, pour améliorer la performance des membranes dans les conditions de température élevée et d'humidité relative faible, et dans la caractérisation des matériaux et des composants. Parmi des exemples de progrès récents :

- ▀ Diminution de la masse équivalente (augmentation de la capacité d'échange ionique) des membranes perfluorosulfonées [membranes 3M (programme DoE) et Aquivion (programme européen Autobrane)], augmentation des masses moléculaires pour une meilleure stabilité mécanique, travaux sur la réticulation de ces polymères pour améliorer la stabilité mécanique;
- ▀ Développement de polymères et de membranes à fonctions protogènes autres que le groupe sulfonique, moins hydrophiles et conduisant dans un environnement moins hydraté. Il s'agit essentiellement des polymères à groupements de type acide phosphonique (Celtec-V de BASF, et travaux récents en Europe, y compris en France). La conductivité de ces membranes est moins fortement fonction de l'humidité relative, y compris à des températures > 100°C;
- ▀ Catalyseurs en alliage platine-M, notamment platine-cobalt (Johnson-Matthey), permettant d'augmenter les performances de l'électrode à air et de diminuer le chargement en platine afin de diminuer les coûts; dans le programme du DoE, le taux de platine actuel des assemblages membrane – électrodes permet d'estimer (projection 500,000 systèmes/an) le coût du stack à \$63/kW en 2009;
- ▀ Des avancées dans le développement des électrodes et des assemblages membrane – électrodes ont permis d'augmenter la stabilité des assemblages lors du fonctionnement, notamment en cyclage ;
- ▀ Développement de stacks incorporant les différents matériaux et procédés issus des ces avancées qui fonctionnent à 110°C, avec une humidification aux électrodes à des températures bien inférieures à celle des cellules (humidité relative à l'anode de 24% et à la cathode de 16%, travaux réalisés dans le programme européen *Autobrane*).

Du point de vue de l'application automobile, les besoins continuent à se situer dans le développement d'AMEs permettant un fonctionnement des PEMFC à la fois en dessous de 0°C et jusqu'à des températures voisines de 130°C, tout en maintenant une conductivité très élevée de manière à ce que la densité de puissance des cellules individuelles du stack ne diminue pas lors de l'augmentation de la température de fonctionnement (accélération, montée de pente, etc.). De plus, les AME dans les conditions dynamiques d'utilisation d'un véhicule ou dans des applications stationnaires de type co-génération domestique (cyclages en température, en humidité relative, en puissance) sont sujets à une détérioration rapide due à la dissolution/migration du catalyseur et à sa re-précipitation avec formation d'amas ou d'agrégats, l'empoisonnement de la membrane, la détérioration des couches de diffusion et des joints, etc.

Pour les prochaines années, les différents objectifs à poursuivre dans le développement des membranes, catalyseurs et des assemblages membrane électrodes sont les suivants :

- ▀ Membranes et ionomères présentant une conductivité protonique élevée sur une large gamme de température de fonctionnement ($-30 < T < 130^{\circ}\text{C}$, à faible humidité relative (25 %) et si possible dans les conditions anhydres ou quasi-anhydres;
- ▀ Membranes à faible gonflement, faibles variations dimensionnelles, forte stabilité mécanique, faible prix de revient;
- ▀ Contrôle des processus d'agrégation, et de dissolution des particules du catalyseur à haute température et au cours de temps, supports de catalyseurs stables vis-à-vis de l'oxydation;
- ▀ Nouveaux catalyseurs nanostructurés de surface spécifique élevée, conduisant à une meilleure accessibilité des réactifs à la surface électroactive, et à une diminution de la charge en platine;

- ▶ Parmi les technologies émergentes, les SAMFC (Solid Alkaline Membrane Fuel Cells) présentent l'avantage de pouvoir utiliser les électrocatalyseurs non nobles de plus faible coût. Jusqu'à présent, cette technologie n'a pu être validée qu'à basse température (< 90°C) et la mise au point de nouvelles membranes anioniques est nécessaire pour aller au-delà de cette température. Le développement des SAMFC doit aussi amener des progrès substantiels dans la conversion directe des alcools au sein des DAFC (direct alcohol fuel cells) puisqu'il est généralement accepté que l'oxydation des alcools tels que le méthanol, l'éthanol etc... est plus rapide dans les conditions alcalines.

2. Objectifs, points durs et domaines prioritaires

Il est utile d'analyser les objectifs techniques, les feuilles de route et les domaines prioritaires de recherches identifiés dans différents programmes au niveau international. En se basant sur les trois plus importants d'entre eux – les programmes américain, allemand et européen (FCH-JU) - il apparaît une concordance à la fois sur les objectifs techniques et sur les points durs qu'il convient de surmonter :

Transport

Objectifs techniques : Traction véhicule

- Coût système : 100 €/kW (à 100,000 unités/an) [DoE \$30/kW à 500,000 unités/an]
- Densité de puissance : > 1 W/cm²
- Durée de vie (voiture) : > 5000 h
- Durée de vie (bus): 10,000 h
- Température extérieure : -25 à +45 °C
- Température de fonctionnement : >100 °C

Objectifs techniques : Unités auxiliaires de puissance

- Coût : 40 €/kW
- Densité de puissance : > 1.6 W/cm²
- Durée de vie : 10,000 – 40,000 h
- Efficacité : > 50%
- Démarrage à froid en : < 35 s

Domaines prioritaires de recherche

- Membranes électrolytes mécaniquement stables et durables, nécessitant peu ou pas d'humidification et présentant des conductivités protoniques à des températures élevées (> 100 °C) pour permettre une simplification des architectures système. Amélioration des procédés de fabrication.
- Catalyseurs à bonne stabilité électrochimique et activité élevée; diminution de la charge en platine, catalyseurs alternatifs à base de métaux non nobles pour réduire les coûts.
- Nouvelles structures d'électrodes, optimisation des couches de diffusion des gaz
- Plaques bipolaires résistantes à la corrosion, et à faible masse, volume et coût.
- Réduction des coûts des matériaux.
- Développement de procédés de production adaptés
- Optimisation de la conception des joints
- Méthodologies et outils pour la prédiction de la durée de vie
- Amélioration de la compréhension des processus fondamentaux dans la pile à combustible par des approches de modélisation, simulation et expérimentation; comportant la caractérisation du transport ionique dans les matériaux de pile à combustible, la relation entre composition, structure, morphologie et propriétés des catalyseurs, amélioration de la compréhension et du contrôle des processus aux électrodes et aux interfaces membrane – électrodes.
- L'impact de la qualité de l'hydrogène (tolérance aux impuretés) sur la performance et la durabilité d'une pile à combustible
- Recherche visant à répondre aux insuffisances technologiques associées au démarrage à des températures négatives
- Nouveaux concepts pour l'alimentation en air
- Optimisation de la re-circulation de l'hydrogène à l'anode
- Optimisation des humidificateurs
- Recherches sur les APU dans le secteur du transport alimentées en combustibles hydrocarbonés : en particulier sur les matériaux, le développement et la mise à l'épreuve de composants et de systèmes (en

particulier la technologie du reformage), démonstrateurs de puissance 10 kW (camions) à 100 kW (aéronautique, maritime).

Application stationnaire et micro-CHP

Objectifs techniques

- Coût système : 400 -1500 €/kW en fonction de l'application, pour le programme allemand NIP
- 4000 – 5000 €/kW pour micro-CHP (incluant le coût du brûleur auxiliaire), et 1500 – 2500 € /kW pour les unités industrielles/commerciales pour le programme européen de la FCH-JU
- Durée de vie : > 40,000 h

Domaines prioritaires de recherche

- Développement de matériaux permettant d'augmenter la température de fonctionnement à > 100 °C (NIP) et > 120 °C (DoE) : assemblages, plaques bipolaires, joints
- Développement de matériaux pour permettre une amélioration de la performance en terme de durée de vie plus élevée et de dégradation plus faible et permettant d'augmenter la stabilité mécanique, électrochimique et thermique de monocellules et de stacks.
- Diminution de la charge en catalyseur (développement de nanostructures etc)
- Augmentation de la densité de puissance et de l'efficacité
- Nouvelles architectures de monocellule et de stack pour améliorer la performance, la durabilité, la robustesse, et pour diminuer les coûts
- Identification des paramètres critiques et de conditions opératoires pour toutes les gammes de puissance ayant un impact sur la dégradation et la durée de vie de monocellules et de stacks, y compris par des épreuves accélérées. Développement de contre-mesures aux effets de dégradation. Compréhension de mécanismes de dégradation des matériaux et aux interfaces dans les conditions de fonctionnement de l'application stationnaire.
- Nouveaux outils de diagnostic (pour la gestion de l'eau, un contrôle simplifié de la tension de cellule...)
- Recherche et développement pour améliorer la performance de tous les composants individuels du système : pile, reformeur, échangeurs de chaleur, gestion du combustible Diminution du coût du système complet (verrou identifié comme prioritaire au Japon).

Marchés précoces – applications portables

- Durabilité de micro piles à combustible dans des conditions typiques de fonctionnement compatible avec une utilisation prolongée et à des densités de puissance requises
- Procédés de production reproductibles et de qualité

Les thèmes précédents plus orientés dans la recherche dite « amont », se retrouvent en grande partie dans les objectifs du GdR « Piles A Combustible, Systèmes » soumis à la labellisation par le CNRS.

3. Forces et faiblesses

Forces :

- Structuration de la communauté "Piles à Membranes" (PACEM) par les GDR depuis 8 ans
- Très nombreuses labellisations de programmes ANR PAN-H et H-PAC impliquant des consortia d'unités associées au CNRS faisant partie du GdR (cet item s'applique aussi au GdR ITSOFC)
- Pluridisciplinarité amont / aval : recherches dans les laboratoires CNRS à la fois sur les matériaux, sur les systèmes et l'intégration : Il est important de maintenir ces deux aspects
- Masse critique de chercheurs : Mais peu de "vrais centres" visibles à l'international
- Programme national ANR PAN'H et H-PAC : Permet le financement des recherches finalisées, mais aussi des sujets importants sont abordés comme la dégradation, la durée de vie, des assemblages, nouveaux matériaux...
- Complémentarité avec les laboratoires CEA : Mais ne pas limiter le CNRS au secteur amont

Faiblesses :

- Absence d'une feuille de route nationale
- Plusieurs programmes et plateformes sans véritable coordination de l'ensemble (ANR – H-PAC, ADEME - HyPac, OSEO - H2E)
- Mise en concurrence (au niveau du financement) entre technologies par les agences de moyens
- Faible financement des recherches à long terme : Manque un programme sur le long terme, budget PIE H₂-PAC trop faible, Recherches dans le cadre de l'ANR pilotées par l'aval
- Faible implication dans les programmes européens, Projets PAN'H, H-PAC plus accessibles qu'un projet PCRD mais taux de réussite comparables, Vision tournée vers le national – affaiblissant la culture et l'information au niveau européen et international
- Absence de continuité dans le tissu industriel en France pour développer une filière complète (faiblesse de l'industrie chimique, en particulier pour les matériaux)
- Peu de concrétisations : les PEMFC apparaissent en France toujours comme une technologie en devenir
- Certaines collaborations difficiles à établir avec le secteur aval
- Recherche de la "rupture technologique" aux dépens de la recherche incrémentale et de la recherche à long terme
- La France ne semble pas en mesure de développer des applications industrielles compétitives.

Piles à combustible (SOFC, PCFC) et électrolyseurs haute température

1. Etat de l'art

L'appellation "Solid Oxide Cell" (SOC) rassemble tous les dispositifs électrochimiques basés sur un électrolyte céramique oxyde fonctionnant à moyenne ou haute température pour produire de l'énergie ou la stocker (Fig. 1); ceci concerne à la fois la pile à oxyde solide SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) et l'électrolyseur de la vapeur d'eau à oxyde solide SOEC (Solid Oxide Electrolyser Cell). Le fonctionnement à température élevée permet à ces dispositifs de s'affranchir de catalyseurs coûteux, d'avoir un rendement élevé, de pouvoir utiliser du gaz naturel (pour les piles à combustible).

Pour l'application de production d'hydrogène, le développement du procédé d'électrolyse haute température de la vapeur d'eau qui permet d'atteindre un rendement énergétique de 90 %, laisse envisager la substitution possible aux procédés conventionnels basés sur les énergies fossiles avec l'avantage supplémentaire d'émettre peu ou pas de CO₂, si l'électricité est d'origine nucléaire ou renouvelable. *(Au niveau mondial, l'hydrogène est produit à 48 % par vapo-reformage du gaz naturel, à 30 % par vapo-reformage ou oxydation partielle de produits pétroliers, à 18 % par gazéification de charbon et seulement à 4 % par électrolyse de l'eau à basse et moyenne températures).*

Quel que soit le dispositif, les éléments constitutifs d'une cellule, cathode, électrolyte et anode sont des céramiques oxydes. A cela s'ajoute, les matériaux d'interconnexion et de scellement qui permettent respectivement d'assembler les cellules et de réaliser l'étanchéité. Ces dispositifs fonctionnent à moyenne (400-600°C) ou haute température (600-800°C) en raison de la conductivité ionique limitée des électrolytes céramiques à plus basse température. En dessous de 400°C, la membrane électrolyte céramique n'est plus compétitive par rapport à la membrane polymère. Parmi les électrolytes céramiques oxydes, se distinguent les conducteurs par ions O²⁻ (l'exemple le plus connu est la zircone stabilisée YSZ) et les conducteurs par ions H⁺ (par exemple le cérate de baryum substitué par de l'yttrium, nommé BCY10). L'intérêt de ces derniers est d'obtenir une conduction ionique significative à plus basse température.

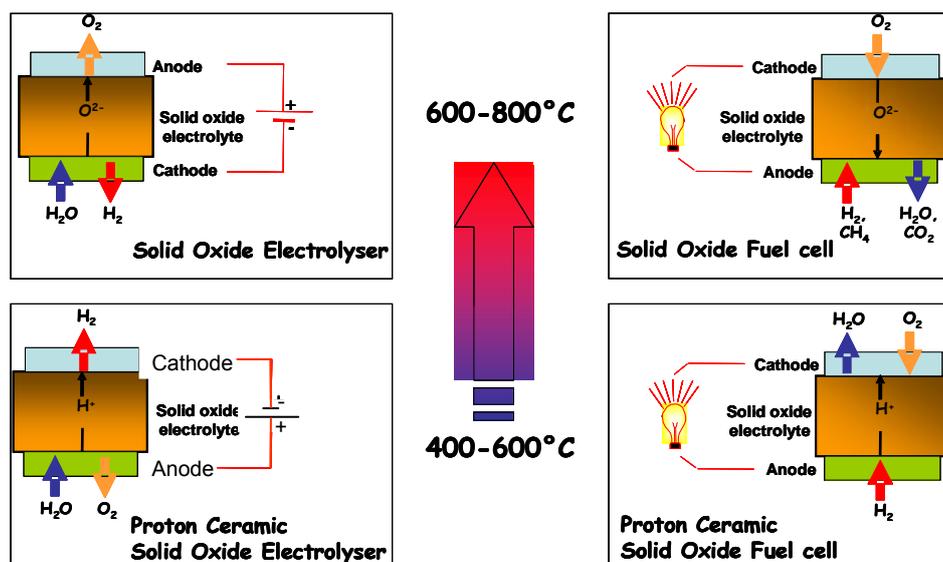


Figure 1. Schémas de principe des différents dispositifs étudiés dans la thématique SOC (selon la température de fonctionnement)

Les systèmes basés sur un électrolyte de type zircone stabilisée fonctionnent actuellement autour de 800°C (SOFC haute température) causant certains problèmes, comme un vieillissement trop rapide des matériaux, un cyclage en température difficile (mauvaise tenue mécanique des matériaux), nécessité d'utiliser des matériaux d'interconnexion onéreux.

La diminution de la température de fonctionnement jusqu'à 500 – 700 °C est un objectif majeur.

La mise au point d'une technologie de deuxième génération à "température intermédiaire" est devenue un consensus général dans notre communauté des piles à combustible car elle permettrait d'atteindre les objectifs technico-économiques requis pour une pénétration du marché de la production décentralisée d'électricité (stationnaire et mobile). Ces dispositifs sont basés sur un électrolyte conducteur anionique soit de type zircone stabilisée déposé en couche mince ou sur des nouveaux matériaux de type céline, apatite, pérovskite, etc...Ceci permettra d'une part d'utiliser des aciers plus classiques pour les plaques d'interconnexion et pour le système en général, et d'autre part de limiter les phénomènes d'inter-diffusion et de réactivité des solides qui se produisent à température élevée (recherche de fiabilité à long terme).

En parallèle à ces travaux, des recherches sur des électrolytes céramiques conducteurs protoniques doivent être encouragés. Ils constitueraient une véritable rupture technologique, avec une diminution de la température de fonctionnement entre 400 et 600°C. Dans ces dispositifs de troisième génération, l'électrolyte est encore un oxyde conducteur par ions O^{2-} à haute température, mais à plus basse température ($T < 600^{\circ}C$) et sous atmosphère humidifiée (typiquement $p_{H_2O} = 0.025 \text{ atm}$), il devient conducteur protonique. La pile à combustible, basée sur ce conducteur par ions H^+ est appelée PCFC (Proton Ceramic Fuel Cell) voire actuellement PC-SOFC (Proton Ceramic SOFC) car elle repose aussi sur un électrolyte oxyde solide (Fig. 1).

Atteindre l'objectif de diminuer la température de fonctionnement implique non seulement la recherche de nouveaux matériaux d'électrolyte conducteurs anioniques et/ou protoniques mais aussi une recherche de nouvelles électrodes. En effet, la diminution de température entraîne une augmentation des chutes ohmiques (Fig. 2) et des surtensions liées à la diminution de la conductivité de l'électrolyte et à la cinétique ralentie des réactions électrochimiques. Ceci nécessite d'améliorer les performances de quasiment tous les éléments constitutifs du cœur de pile (valable aussi pour l'électrolyse), notamment de l'anode et de la cathode où se produisent les réactions d'oxydoréduction.

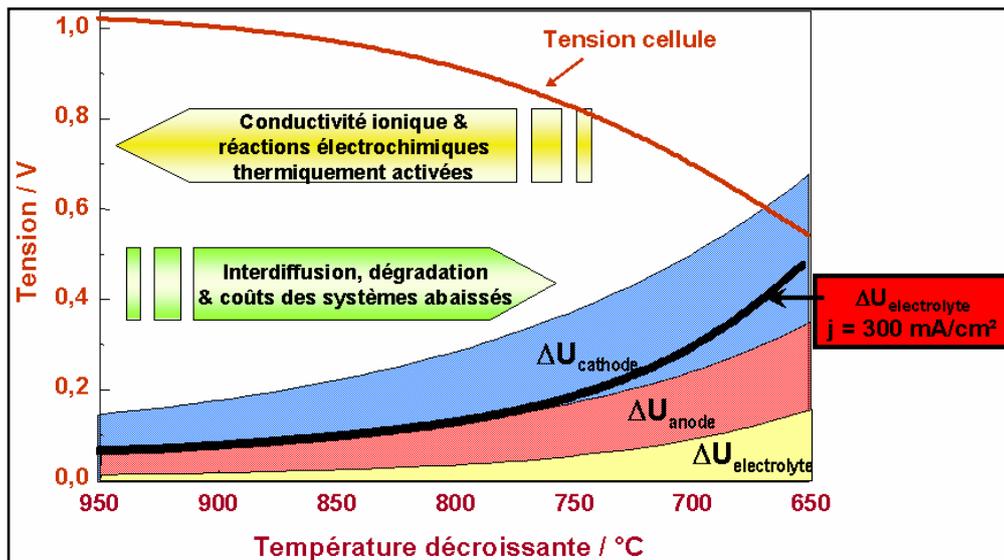


Figure 2 : Tension de cellule d'une pile SOFC selon sa température de fonctionnement

D'un point de vue général, le développement des dispositifs SOCs passe par la résolution de divers points durs : choix de politiques énergétiques, choix économiques d'industriels, résolution de verrous techniques. Le CNRS doit avoir une contribution notamment sur ce dernier point et plus spécialement dans les recherches concernant les cœurs de pile, voir le développement de stack.

Les équipes de recherche du CNRS ont privilégié deux axes étroitement liés à leurs compétences de base dans les domaines de la chimie du solide, du génie des matériaux, de l'électrochimie et de la modélisation.

- ▀ la conception de nouveaux matériaux performants pour l'électrolyte et les électrodes mais aussi pour interconnecteurs et joints de scellement.
- ▀ la maîtrise de la mise en forme des cellules élémentaires, leurs tests (performances et durabilité).

Ces recherches sont originales en Europe, certaines très spécifiques à la France, et ont un niveau mondial reconnu.

2. Quelles thématiques doit-on alors soutenir ?

Elles sont déclinées dans la demande de GdR « Piles A Combustible, Systèmes »:

Nouveaux matériaux pour Solid Oxide Cells

✔ *Electrolytes céramiques*

La réflexion doit concerner des matériaux nouveaux en termes de structure cristalline, de composition et de mécanismes de diffusion ou de propriétés de transport au sens large. La communauté des chimistes du solide doit se montrer active dans ce domaine et elle représente à ce jour un atout important et quasiment une exception en Europe.

L'un des points clés concerne la recherche d'un nouvel électrolyte solide pour SOFC (IT-SOFC et PC-SOFC) répondant à un cahier des charges de fonctionnement à une température inférieure à 700 °C : une conductivité ionique de $10^{-1} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ à cette température constituerait une avancée majeure. Ces recherches devront s'appuyer sur une modélisation des mécanismes de transport prospective.

✔ *Nouveaux matériaux d'électrodes*

L'abaissement de la température de fonctionnement nécessite d'améliorer aussi et de manière significative les performances électrocatalytiques des électrodes, sièges de fortes surtensions.

Coté cathode, une voie innovante consiste à rechercher de nouvelles familles de matériaux **conducteurs mixtes** (à la fois conducteurs électroniques et ioniques de l'oxygène, MEIC). Ces matériaux devront, de plus, être résistants à l'empoisonnement au chrome issu des interconnecteurs. Des progrès significatifs ont

été réalisés par le CNRS au cours de ces dernières années (brevets). Ils doivent être concrétisés par un développement industriel de ces matériaux.

Côté anode (combustible), l'utilisation d'autres combustibles autres que l'hydrogène (méthane, biogaz, gaz de synthèse) qui constitue un atout majeur des SOFCs, la mise au point de nouveaux catalyseurs insensibles notamment à la présence de soufre est indispensable. L'anode de la pile doit, ainsi, posséder à la fois de bonnes propriétés catalytiques pour le reformage ou l'oxydation directe du combustible et des performances électrochimiques significatives pour la réaction d'oxydation elle-même. Un effort important pour la recherche de nouveaux catalyseurs pour l'utilisation de bio-combustibles, bio-gaz doit être fait.

✔ **Interconnecteurs et verres de scellement**

Cette thématique connaît un développement important lié à la réalisation d'assemblages de cellules élémentaires pour les tester en empilements (stacks). Le verre de scellement permet de réaliser l'étanchéité entre une cellule et son support. Les interconnecteurs doivent à la fois permettre de collecter le courant et de séparer comburant et combustible. Les matériaux doivent donc être de bons conducteurs électroniques, étanches et en raison du niveau de température élevé, et avoir une bonne résistance en milieu oxydant et réducteur.

Une voie innovante est la réalisation par dépôt successifs des matériaux de cœur de pile sur un interconnecteur métallique support poreux. Cette dernière technologie, appelée cellule à métal support, permettrait notamment une réduction de l'épaisseur de l'anode, améliorerait les cinétiques d'échange et diminuerait le coût de la cellule. En outre, le meilleur contact entre l'interconnecteur et l'anode devrait augmenter la durée de vie des cellules.

Au sein du CNRS, une communauté nouvelle associant des métallurgistes pour les plaques bipolaires et des chimistes des verres de scellement devrait être encouragée à participer. Cette communauté, déjà proche de celle des chimistes du solide au CNRS et au CNU, serait à même de pouvoir répondre aux questions des industriels tels que EDF, GDF, St Gobain ou le CEA, pour la réalisation de dispositifs à petite ou moyenne échelle.

Mise en forme des matériaux de cœur de piles

Une des étapes fondamentales dans l'élaboration d'éléments de piles à combustible ou d'électrolyseurs est la synthèse des composés d'électrodes ou d'électrolyte sous forme de poudres fines à morphologie contrôlée ou de gels à viscosité donnée.

Des recherches actives dans ce domaine sont menées par plusieurs équipes du CNRS et doivent être poursuivies.

La réalisation d'une cellule SOFC ou SOEC nécessite ensuite une mise en forme spécifique des électrodes et/ou de l'électrolyte: l'électrolyte doit être sous forme d'une membrane dense, étanche, d'épaisseur variant de 15 μm à 150 μm et sépare les électrodes déposées sous forme de couches minces ou épaisses à porosité variable et contrôlée.

L'évolution récente des techniques permet d'aborder aujourd'hui la réalisation d'une grande variété de matériaux sous forme de couches minces, notamment d'oxydes. Plusieurs groupes du CNRS possèdent un savoir-faire indéniable et reconnu pour la confection de couches minces ou épaisses de matériaux pour SOC (techniques sol-gel, coulage en bandes, sérigraphie, projection plasma, PVD magnétron,...).

Le défi majeur est la réalisation de cœurs de pile SOFC en utilisant des technologies « bas coût » qui permettraient d'obtenir la cellule complète en un minimum d'étapes lors du process de fabrication.

Electrochimie des cœurs de cellules

Plusieurs équipes du CNRS sont à ce jour à la fois sur le plan technique mais aussi sur le plan des connaissances de base à un niveau international en ce qui concerne l'étude des propriétés électriques et électrochimiques des cellules. Citons à titre d'exemples la réalisation d'études *in situ* des matériaux sous polarisation, de mesures originales de conductivité par relaxation, des propriétés de transport ionique par échange isotopique, ...

Par ailleurs, le volet modélisation prend une importance croissante pour la compréhension des mécanismes de transport électronique et/ou ionique qui gouvernent les matériaux d'électrolyte et d'électrodes et la réalisation d'électrodes. Plusieurs équipes se consacrent à la modélisation des processus électrochimiques

avec l'établissement des propriétés locales des électrodes. Cette démarche permet de comprendre et de hiérarchiser l'importance des phénomènes physiques mis en jeu. Elle fournit les éléments fondamentaux indispensables à l'analyse du fonctionnement des cellules électrochimique, à l'optimisation et à l'établissement de recommandations.

Performances des cellules, durabilité et robustesse

Cette thématique, assez proche de l'application, concerne la caractérisation de cellules et de stacks en mode pile SOFC ou électrolyseur EHT et l'étude de la réactivité et de la durabilité de cœurs de pile en conditions de fonctionnement. Des tests de longue durée et des analyses *post mortem* permettent de mieux comprendre les mécanismes de dégradation. Des bancs de tests de cellules de petites et moyennes dimensions (1 - 25 cm²) sous différentes conditions de gaz sont disponibles dans quelques équipes.

Le vieillissement des cellules est l'un des problèmes les plus importants. Il requiert d'étudier la réactivité solide – solide et le vieillissement aux interfaces (précipitation de phases nouvelles, diffusions inhibitrices...) des cellules mais aussi l'empoisonnement par le chrome issu des interconnecteurs.

L'amélioration de la tolérance des matériaux anodiques au sulfure d'hydrogène est aussi un problème important à considérer dans la mesure où il est envisagé d'utiliser des gaz de synthèse, des biogaz ou encore du gaz naturel contenant des molécules soufrées.

3. Conclusions

Le CNRS se situe à très bon niveau dans le contexte international en ce qui concerne la recherche de base sur les composants de cœur de pile. Elle est notamment depuis quelques années excellentement positionnée dans le domaine de l'électrolyse de la vapeur d'eau (activité redémarrée en Europe en 2004) en relation avec les objectifs de la politique énergétique française.

Grâce au GDR, la communauté est bien identifiée et la collaboration avec quelques industriels (EDF, St Gobain, GDF) et notamment le CEA bien établie. Cette dernière s'est renforcée au cours des dernières années par la participation à de nombreux contrats, le soutien du CEA dans le financement de thèses, des réunions du GDR.

Les supports financiers de l'ANR et de l'ADEME ont permis à certaines équipes d'atteindre la dimension internationale et de participer dans des programmes européens. Le CNRS y contribue par ses chercheurs et le GDR, de manière beaucoup plus modeste dans ses appels à projets.

La faiblesse est la dissémination des groupes dans de nombreux centres (une vingtaine), même si certains émergent. Ceci se traduit par une faiblesse dans l'organisation générale : le CNRS gagnerait à avoir un représentant "officiel" ayant la tâche dévolue de le représenter dans diverses instances et ayant mandat pour le faire.

Une autre faiblesse de l'organisation générale est l'absence d'un centre de valorisation des recherches menées au CNRS. Une réflexion devrait être menée avec le CEA pour que les deux organismes arrivent à créer à terme un centre de développement, par exemple équivalent au [Forschungszentrum Jülich](#) en Allemagne ou Risoe-Topsoe (partenariat public-privé) au Danemark.

Hydrogène : production (hors électrolyse), stockage ; transport

Le Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS, par l'intermédiaire de son Groupe d'Action Thématique « Piles A Combustible, Hydrogène » a contribué à structurer la communauté Hydrogène, ce qui a conduit à la labellisation en 2008 du GdR ACTHYF « Acteurs de la communauté Hydrogène en France ». Ce qui suit est en grande partie le fruit de la réflexion des membres de ce GdR.

1. Etat de l'art

Productions d'hydrogène économes en CO₂ (hors électrolyse)

La production d'hydrogène économe en CO₂ implique le choix de sources d'hydrogène exemptes de carbone (sources naturelles, décomposition de l'eau, etc.) ou contenant un carbone renouvelable (biomasse).

Hydrogène géologique

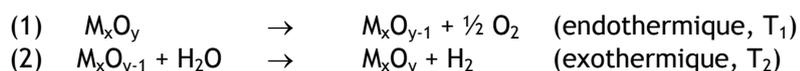
Cette thématique est dédiée à l'étude de la production naturelle abiotique de l'hydrogène. Il s'agit de mener des expérimentations en laboratoire pour reproduire les réactions intervenant au niveau de sites où l'hydrogène naturel est produit (dorsales océaniques, zones de faille). Ces expériences auront pour but de contraindre les relations composition-température-pétrophysique des roches-cinétique de production-flux d'hydrogène. En présence de CO₂, on peut également jouer sur la production d'H₂ et le stockage de CO₂. Un deuxième volet concerne l'utilisation de membranes à hydrogène développées par le monde industriel ou académique et testées dans des conditions pression-température-chimie proches du système naturel. Ces expériences auront pour but de vérifier la bonne tenue des membranes dans les conditions agressives rencontrées dans le milieu naturel, et finalement la possibilité d'extraction d'H₂ "in-situ". Enfin, il s'agira de caractériser des sites de production naturelle d'H₂. A l'heure actuelle, les travaux sont focalisés sur les dorsales océaniques mais il existe d'autres sources possibles. Ces travaux seront menés avec d'autres acteurs en sciences de la terre, spécialistes de la géologie et des mesures de terrain.

Hélio-hydrogène

Cet axe concerne la décomposition de l'eau par cycles thermo-chimiques de production d'hydrogène basés sur la mise en œuvre de réactions chimiques successives dont le bilan global est :



Après le développement d'une base de données d'environ 300 cycles (CNRS), des analyses thermodynamiques et expérimentales ont permis de sélectionner des cycles courts (2 à 3 étapes) basés sur les réactions d'oxydoréduction suivantes :



Ces réactions ne sont pas réalisables avec une source d'énergie nucléaire car l'étape endothermique nécessite des températures de 1200°C à 1800°C. Par contre, elles sont tout à fait envisageables avec l'énergie solaire concentrée.

Trois familles de cycles oxydes sont envisageables :

- Les cycles à oxydes non volatils (exemple, Fe₂O₃)
- Les cycles à oxydes volatils (exemple, ZnO)
- Les oxydes mixtes ou ferrites (exemple, NiMnFe₄O₈)

Pour chaque famille, il s'agit d'identifier les schémas réactionnels, de déterminer les cinétiques de réactions, de comparer les rendements (chimiques et énergétiques) attendus, de mettre en évidence les étapes limitantes des procédés associés et, enfin, de prévoir les rendements globaux de conversion : source d'énergie primaire → hydrogène, en fonction des bilans matière et énergie associés à chaque famille.

Les études actuelles visent à définir les cinétiques des réactions de décomposition et d'hydrolyse des cycles thermo-chimiques les plus prometteurs basés sur des réactions rédox de couples oxyde/métal et oxydes/sous-oxydes et à réaliser des synthèses d'oxydes mixtes réactifs avec la vapeur d'eau. Les compétences en chimie du solide de certains acteurs du GDR seront ici un atout très intéressant.

Bio-hydrogène

L'activité dans ce domaine vise à développer de nouveaux outils, issus ou inspirés du monde vivant, afin de valoriser l'hydrogène dans les secteurs suivants : photo-production, fermentation, valorisation de biomasse, bio-piles et chimie bio-inspirée. Plusieurs pistes sont envisagées pour permettre de mettre graduellement en place des applications liées à l'exploitation de l'hydrogène. Il s'agit de i) de la comparaison et du choix des souches bactériennes produisant l'hydrogène, ii) de la compréhension du rôle des enzymes hydrogénases dans le métabolisme énergétique, iii) des études et des optimisations moléculaires des potentialités enzymatiques, iv) de la conception de nouveaux catalyseurs, v) de l'étude de biosenseurs et de bio-piles et vi) de la production biologique d'hydrogène.

Hydrogène photo-électrolytique

Une approche prometteuse concerne l'électrolyse de l'eau photo-assistée, voire la photo-décomposition électrochimique directe de l'eau, à l'aide de photo-électrodes à base de semi-conducteurs de type n (n-SC) ou p (p-SC). D'après la littérature (Fujishima et Graätzel), les nombreuses tentatives destinées à déplacer la fenêtre d'absorption de TiO₂ dans le domaine visible ou à élaborer des oxydes n-SC à énergie de bande interdite adaptée ont échoué ou ont conduit à des matériaux sensibles à la photo-corrosion. Des progrès

significatifs ont été obtenus en séparant les fonctions d'absorption de la lumière (par des colorants), de séparation de charge (une interface entre un n-SC à large énergie de bande interdite tel TiO_2 ou la pérovskite SrTiO_3 et un électrolyte) et d'électrocatalyse. La mise au point de tels catalyseurs reste un défi qui nécessite le développement de collaborations transversales entre chimistes, électrochimistes et photo-physiciens.

Stockage solide de l'hydrogène

Parallèlement aux difficultés liées à une production propre de grandes quantités d'hydrogène, se pose également le problème de son stockage en particulier pour les applications embarquées. Différents moyens de stockage ont été envisagés pour l'hydrogène et sont actuellement en concurrence : le stockage gazeux sous pression, le stockage cryogénique sous forme liquide et enfin le stockage solide dans des hydrures et des matériaux adsorbants. Ce dernier mode de stockage bénéficie d'une communauté nationale très active et qui couvre assez largement les différents systèmes envisagés.

Hydrures métalliques

De nombreux métaux et alliages ont la propriété d'absorber réversiblement l'hydrogène. Cette solution présente beaucoup d'intérêt en termes de sécurité, de rendement global et de fiabilité. Toutefois, pour être rentables, ces composés doivent présenter des capacités spécifiques élevées, une bonne réversibilité, une cinétique rapide et un respect de l'environnement. Les nombreuses recherches menées ces dernières années sur les composés intermétalliques ont pu mettre en évidence leur bonne capacité volumique (de l'ordre de 100 g.dm^{-3}) ce qui en fait un moyen de stockage très compact. Cependant, leur capacité massique (1 à 3 %) reste faible pour les applications embarquées. Il existe toutefois des pistes pour améliorer ce paramètre. Les recherches actuelles pointent vers une déstabilisation des hydrures trop stables (application d'une pression physique ou chimique) ou une amélioration des cinétiques d'absorption/désorption par l'ajout d'éléments "activants". Trois familles de matériaux sont particulièrement étudiées : les composés à base de magnésium, les dérivés des phases de Laves de structure cubique centrée (bcc) ainsi que des polytypes originaux dans des systèmes à base d'alcalino-terreux et de métaux de transition. Les recherches couvrent l'élaboration, l'optimisation de la mise en forme ainsi que les caractérisations structurale, physicochimique et thermodynamique des alliages et hydrures correspondants. Un autre volet concerne la synthèse sous très hautes pressions d'hydrogène qui permet la démixtion contrôlée de nano-précipités catalytiques ou encore la synthèse de composés métalliques hyperlacunaires aux propriétés originales.

Hydrures complexes réversibles

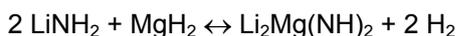
Les hydrures métalliques complexes sont des composés pour lesquels les atomes d'hydrogène établissent des liaisons covalentes ou ioniques avec les atomes métalliques voisins. Ce type de liaison contraste avec celui mis en jeu dans les hydrures métalliques interstitiels décrits précédemment où l'interaction hydrogène-métal est de type métallique. Les hydrures métalliques complexes peuvent être classés dans deux familles : les hydrures complexes de métaux de transition, comme BaReH_9 et Mg_2FeH_6 , et les hydrures complexes de métaux autres que ceux de transition, comme NaAlH_4 , NaBH_4 et LiBH_4 . En ce qui concerne les propriétés de stockage, la première famille possède des rapports hydrogène/métal très élevés ($\text{H/M} = 4,5$ pour le BaReH_9) ainsi qu'une forte capacité volumique (150 g.dm^{-3} dans Mg_2FeH_6). En revanche, ces hydrures sont thermodynamiquement assez stables. Pour atteindre une pression de désorption d'hydrogène de 1 bar, des températures supérieures à 300°C sont habituellement nécessaires. Pour les hydrures complexes de métaux autres que ceux de transition, des températures de désorption plus modérées sont suffisantes. Ainsi, des conditions plus proches des conditions normales de pression et de température sont obtenues pour l'alanate de sodium NaAlH_4 , l'hydrure complexe le plus intéressant aujourd'hui pour le stockage réversible de l'hydrogène ($C_{\text{rev}} = 5.6\% \text{ mass.}; 75 \text{ g.dm}^{-3}$).

Les amidures et imidures métalliques forment une autre famille d'hydrures complexes possédant respectivement des groupements covalents NH_2^- et NH^{2-} . Des propriétés très intéressantes pour le stockage de l'hydrogène ont été obtenues avec le système Li-N-H. Le nitrure de lithium Li_3N absorbe 11.4 % massique d'hydrogène à 255°C sous 3 bars de pression. La réaction a lieu en deux étapes :



La seconde étape (6,5 % massique) est réversible. Elle est caractérisée par un plateau de pression situé à environ 1 bar à 280°C . La désorption d'hydrogène à partir de l'amidure de lithium LiNH_2 passe par la formation intermédiaire d'ammoniac NH_3 . Celui-ci réagit rapidement avec LiH en formant l'imidure de lithium Li_2NH et l'hydrogène. La réaction entre NH_3 et LiH est si rapide qu'aucune vapeur d'ammoniac n'est libérée pendant la désorption. En raison de la toxicité de l'ammoniac et du possible empoisonnement de la pile à combustible, le rôle de piège à NH_3 joué par LiH doit être garanti en vue de l'utilisation de ces composés pour le stockage réversible de l'hydrogène.

Par ailleurs, la substitution de LiH dans le mélange LiH /LiNH₂ par un hydrure moins stable, comme MgH₂, permet d'abaisser la température de désorption d'hydrogène. Le chemin réactionnel est le suivant :



Cette réaction permet de stocker réversiblement 5,6 % d'hydrogène en masse à 180°C. Ce système est caractérisé par ses bonnes propriétés thermodynamiques, puisqu'une pression d'équilibre de 1 bar d'hydrogène à près de 100°C est possible. Toutefois, les cinétiques d'absorption/désorption d'hydrogène doivent encore être améliorées pour les températures inférieures à 180°C.

Pour cette raison, les amidures et imidures métalliques font actuellement l'objet de nombreuses études.

D'autres nitrures métalliques, comme Ca₃N₂, ont également été signalés comme des matériaux absorbants réversiblement de l'hydrogène.

Hydrures complexes irréversibles

Ces matériaux sont adaptés au stockage d'hydrogène pour des applications fixes ou portables d'hydrogène à la demande. L'objectif est de développer un générateur passif d'hydrogène permettant d'alimenter une pile à combustible pour des applications de faible puissance (téléphonie mobile et outils nomades). Le principe du générateur repose sur la réaction d'hydrolyse des borohydrures, qui disposent d'une capacité de stockage élevée en hydrogène (de l'ordre de 10 %), et le but principal de la recherche est l'optimisation des conditions d'hydrolyse par la catalyse. La réaction standard correspond à une hydrolyse :



Dans ce système de type « start and stop », la recherche d'un catalyseur induisant une production rapide et totale d'hydrogène est primordiale. Il s'agit de maîtriser la cinétique de libération d'hydrogène et d'approcher les rendements théoriques. Les rendements d'hydrolyse et la capacité de maîtrise de la réaction peuvent être évalués par calorimétrie et mesures volumétriques du dégagement d'hydrogène associé.

Lors de la réaction d'hydrolyse du borohydrure de sodium NaBH₄, l'eau devient un réactif et le rendement de stockage de l'hydrogène est fonction de la stoechiométrie borate-eau après la réaction. Ainsi il chute de 10,8% (réaction à 2 moles d'eau) à 7,3% (réaction à 4 moles d'eau) selon l'hydrate du métaborate formé.

- Matériaux poreux

Le stockage de l'hydrogène peut s'effectuer par physisorption à basse température sur des matériaux présentant de très grandes surfaces spécifiques. A la différence des hydrures, le phénomène d'adsorption met en jeu de l'hydrogène moléculaire sans dissociation de la molécule. Les interactions sont de type Van der Waals et les énergies de liaison mises en jeu sont faibles ce qui ne peut conduire à des capacités significatives qu'à basse température (typiquement à la température de l'azote liquide) et sous des pressions parfois élevées. De plus, la capacité est très fortement dépendante de la surface spécifique développée dans le matériau. On observe en général une isotherme d'adsorption dite de type I ou de Langmuir qui correspond à la formation d'une monocouche simple et complète à la surface du matériau.

Différentes familles de matériaux peuvent être envisagées pour le stockage de l'hydrogène par adsorption à basse température. Dans tous les cas, ces matériaux présentent des surfaces spécifiques élevées liées à la présence de volumes micro- ou nanométriques ou à un caractère fortement divisé. On peut citer :

- les carbones activés. Ils sont obtenus par gazéification du charbon ou de l'antracite en phase vapeur à 1000°C, par activation chimique à l'acide phosphorique ou KOH et carbonisation à 500°C, par pyrolyse de polymères synthétiques (polyacrylonitrile) ou par préparation de réplique de silicates. Ils sont constitués de plans de graphène très désorganisés développant ainsi de larges surfaces spécifiques. Des capacités de stockage d'hydrogène de 5.1% à la température ambiante et à 20 MPa ont été déjà obtenues. La microporosité des meilleurs matériaux pourrait être encore modifiée soit par compression à haute température, le nombre et la largeur des pores dépendront des paramètres temps, pression, température ; soit par craquage de méthane à une température comprise entre 750 et 850°C.
- les organométalliques de type métal-dicarboxylate de benzène tel que M(OH)(O₂C-C₆H₄-CO₂) (M = Al³⁺, Cr³⁺). Leur structure forme des tunnels carrés infinis de l'ordre de 0,85 nm de côté et les réseaux organométalliques (Metal Organic Framework ou MOF) comme le MOF-5 de formule chimique Zn₄O(BDC)₃(DMF)₈(C₆H₅Cl) avec (BCD = 1,4 -dicarboxylate de benzène; DMF = diméthyl-formamide) adopte une structure bâtie sur des clusters de tétraèdres ZnO₄ reliés ensemble par des groupements organiques conduisant à la formation de tunnels unidimensionnels en forme de losange de section 7,8 x 11,2 Å². Les charpentes poreuses résultant de ces assemblages peuvent se décrire dans deux sous-groupes. Le premier comprend des architectures poreuses rigides à base de tunnels unidimensionnels

ou de larges cavités caractérisés par des surfaces spécifiques de Langmuir variant de 1000 jusqu'à 5500 m².g⁻¹. Le second groupe de composés est défini par l'existence de réseaux flexibles avec des tunnels ou des cages dont la taille évolue en fonction des espèces insérées (gaz –CO₂, CH₄– ou liquide –éthanol, DMF,...). Différentes phases de type MIL, développées à l'Institut Lavoisier de Versailles, ont fait l'objet de mesures pour leurs capacités d'adsorption d'hydrogène. Ainsi, il a été observé que la phase MIL-53 est capable d'adsorber l'hydrogène jusqu'à 3,8 % (massique) pour le composé à l'aluminium et 3,1 % pour l'isotype au chrome à 77K sous 16 bars. D'autres tests d'adsorption d'hydrogène ont également été réalisés sur les carboxylates à base de trimères de chrome : MIL-100(Cr), MIL-101 (Cr) et MIL-102 (Cr). Le solide MIL-102 est un tétracarboxylate de chrome présentant des tunnels de petite taille (< 5 Å) et n'absorbant pas d'azote à 77 K. Les performances, à 77 K, sont fonction de la taille des pores : de 1 % pour le MIL-102 à 35 bar jusqu'à 6,1 % pour le MIL-101 à 80 bar. A température ambiante, les résultats sont inversés avec 0,43 % pour le MIL-101 mais 0,05 % pour le MIL-102.

Enfin, l'hydrogène peut également être stocké par voie électrochimique dans les carbones nanoporeux par électro-réduction de l'eau. L'hydrogène piégé est faiblement chimisorbé, ce qui rend cette propriété très attractive pour des applications au stockage électrochimique de l'énergie. On peut ainsi envisager d'utiliser les carbones poreux comme électrode négative dans des batteries ou supercondensateurs. D'après les travaux accomplis, il semble que les paramètres principaux qui contrôlent les performances électrochimiques sont le volume d'ultra-micropores (<0.7-0.8 nm) et la fonctionnalité de surface des carbones. Cependant, il a été pour l'instant impossible d'établir des corrélations qui permettent de décrire les performances observées et de définir des stratégies d'optimisation et il convient donc de continuer les études en cours afin de mieux définir les sites actifs ainsi que la forme des pores optimaux pour un stockage efficace.

Modélisation des matériaux

Parallèlement à l'étude des matériaux, une étape de modélisation s'avère indispensable pour une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu et pour guider les expérimentateurs dans leurs recherches de matériaux toujours plus performants.

Au plan théorique, il s'agit d'apporter un éclairage au niveau fondamental sur les matériaux en relation avec leurs propriétés d'absorption d'hydrogène au moyen d'études *ab initio* dans le cadre de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT). Pour les applications, et en particulier le stockage, les propriétés thermodynamiques (stabilité, capacités maximum d'absorption d'hydrogène...) jouent un rôle crucial. Elles peuvent être modulées par des substitutions grâce à des éléments de taille et de nature chimique différentes qui modifient les propriétés élastiques et électroniques de l'intermétallique et par voie de conséquence, les propriétés d'absorption d'hydrogène. L'objectif est d'établir des lois de comportement et d'en comprendre l'origine microscopique, grâce aux calculs *ab initio*, afin de guider plus efficacement le choix des matériaux pour l'application souhaitée.

Les matériaux à l'étude sont des composés intermétalliques à base de métaux de transition et terres rares, substitués ou non, des hydrures complexes à base de métaux de transition et d'alcalins ou alcalino-terreux, ainsi que des hydrures complexes constitués d'éléments légers.

Sur le plan de la physisorption, plusieurs pistes sont envisagées. Il s'agit en particulier de renforcer la physisorption par du dopage d'éléments donneurs d'électrons vis à vis des espèces de la matrice poreuse afin de créer des champs électriques suffisant dans les cavités pour stocker par effet de polarisation (aussi appelé induction) de l'hydrogène. En ce qui concerne les matériaux hybrides, associant des poreux à des particules métalliques dispersées dans la matrice, il s'agit d'identifier les meilleurs métaux à disperser, de déterminer la taille optimale des agrégats pour un stockage réversible et la stabilité thermodynamique des agrégats dispersés. Un effort doit être porté également sur le choix des matrices d'accueil (mésopores versus micropores, carbones MOF, répliques de zéolithes, etc.).

Développement des réservoirs : contraintes mécaniques, échanges thermiques et cinétiques

Quelle que soit la méthode de stockage utilisée (gaz sous pression ou sorption dans un matériau solide), il est nécessaire de développer des enveloppes efficaces pour contenir la matière active des réservoirs et permettre les échanges de flux (fluide, chaleur, etc...).

En ce qui concerne la haute pression, la solution innovante pour ce type de stockage vient aujourd'hui des structures en fibres bobinées et en résine qui permettent d'atteindre des pressions de stockage élevées tout en réduisant la masse de l'enveloppe. Actuellement, des pressions de service de 350 bars sont couramment proposées et les recherches s'orientent vers des pressions encore plus importantes de l'ordre de 700 à

800 bars. Dans ces conditions, des capacités volumiques de l'ordre de 40 g.dm^{-3} sont obtenues et des capacités massiques de près de 5-6 % pour le système complet sont envisageables. La structure d'un réservoir composite en fibre et résine est toutefois plus complexe que celle d'un réservoir en acier. De par la forte anisotropie du matériau composite, il est nécessaire de concevoir, développer et réaliser des prototypes d'enveloppes en jouant sur les paramètres de l'enroulement filamentaire (procédé utilisé pour fabriquer le renfort en fibres bobinées) et de simuler leur comportement à l'aide d'outils numériques. Ces étapes doivent permettre d'optimiser en terme de tenue mécanique les structures ainsi réalisées.

Dans le domaine des réservoirs à hydrures ou plus généralement réservoirs pour stockage solide, de nombreuses avancées sont également attendues en ce qui concerne l'enveloppe. En particulier, le développement de ces enveloppes nécessite de maîtriser et d'améliorer les échanges thermiques. Les réactions induites par les phénomènes d'absorption ou d'adsorption sont tantôt exothermiques, tantôt endothermiques, et il convient en conséquence soit de gérer le dégagement de chaleur, soit d'en fournir afin d'entretenir le procédé. On notera que différentes techniques telles que l'ajout de Graphite Naturel Expandé (GNE) sont à l'étude. Par ailleurs, des interrogations subsistent sur les contraintes mécaniques engendrées par la dilatation de la poudre dans les réservoirs lors de l'hydruration. Pour ces deux premiers points, on s'attache à comprendre et modéliser le comportement tant du contenant (matériaux composites) que du contenu (matériaux carbonés, intermétalliques). Il est important de poursuivre dans cette voie et de développer une expertise des matériaux et une connaissance de leur comportement thermomécanique.

Enfin, et comme suite aux remarques précédentes, afin d'améliorer le rendement du procédé (forte exothermicité/endothermicité de l'absorption/désorption), il sera pertinent de concevoir des systèmes complexes, intégrant, par exemple, la récupération de la chaleur générée lors de la phase d'absorption, en la stockant dans un matériau à changement de phase (sels). Le stockage temporaire de la chaleur produite lors du chargement pourra ainsi être utilisé lors de la demande d'hydrogène (désorption). Il serait donc nécessaire de mener des études dans les domaines suivants :

- choix de matériaux à changement de phase ayant une température de fusion adaptée aux besoins de l'application,
- conception et optimisation de réservoirs intégrant des promoteurs de transferts thermiques et des matériaux à changement de phase,
- mesure des contraintes mécaniques subies par l'enveloppe du réservoir et dimensionnement de cette enveloppe.

Purification, membranes et catalyse

Membranes et procédés membranaires

Dans la plupart des méthodes de production de H_2 , une étape de séparation/purification est nécessaire. Pour cette étape, l'utilisation de membranes est une approche élégante, qui permet de pouvoir travailler en continu et qui peut, dans certains cas, augmenter le rendement ou abaisser la température des réactions de production de H_2 par un effet extracteur (déplacement des équilibres thermodynamiques). Pour certaines méthodes de production de H_2 , le développement d'une membrane à intégrer dans le procédé est même considéré comme un point clé pour sa viabilité.

- *Membranes polymères, hybrides et composites organique/inorganique*

En dessous de 200°C , les membranes polymères (qui fonctionnent par un mécanisme de solution/diffusion) sont utilisables. Ces membranes doivent généralement fonctionner sous forte pression pour donner des flux conséquents et fonctionnent par concentration de l'hydrogène et extraction préférentielle (solubilisation) des autres gaz tels que le CO_2 par exemple.

Un certain nombre de travaux actuels s'intéressent aux membranes hybrides et composites organique/inorganique pour améliorer la stabilité (thermique et chimique) et les performances (perméance/perméabilité) de ces membranes.

- *Membranes purement inorganiques*

Lorsqu'une extraction sélective de H_2 au travers de la membrane est nécessaire ou lorsque la séparation doit être réalisée au-delà de 300°C et/ou en milieu corrosif, seules les membranes purement inorganiques (métalliques ou céramiques) peuvent être utilisées. Les membranes commerciales à base d'alliages de Pd sont extrêmement sélectives mais leur coût reste lié à la disponibilité de la matière première. De plus, elles ne peuvent pas toujours répondre à la grande diversité des cahiers des charges pour la purification de H_2 (impuretés soufrées, conditions parfois sévères de pression, température, cyclages thermiques, corrosivité et complexité des mélanges, ...). Le JARI (Japon) et le

DOE (USA) ont donc lancé plusieurs programmes d'envergure ciblant le développement et l'intégration de membranes céramiques et composites céramique-métal dans les procédés de production de H₂.

A ce jour, les pistes les plus prometteuses concernent les membranes ultra-microporeuses à base de silice amorphe, de silicates ou bien les membranes denses composites de type perovskite-métal.

Des innovations sur les matériaux membranaires (organiques/inorganiques ou purement inorganiques) sont encore attendues pour apporter des solutions, tant au niveau de la reproductibilité et la thermostabilité des membranes et des supports, que de leurs performances en séparation, mais aussi de la durabilité, du coût et de la compacité des modules.

L'obtention d'avancées significatives dans ce domaine clé, très peu étudié en France, nécessite la structuration d'un consortium pluridisciplinaire (idéalement les membres du GdR) qui permettra :

- ▀ de développer de nouvelles membranes pour le transport sélectif de H₂, par ex. à partir des matériaux étudiés pour le stockage de H₂ (hydrures métalliques réversibles, MOFs,...)
- ▀ de mettre en œuvre une plateforme de test standardisée et sécurisée pour les membranes sélectives à H₂,
- ▀ de générer des programmes de R&D permettant une extension d'échelle au travers du développement de modules et de procédés intégrés.

Catalyse

De nombreux matériaux (alliages à base de magnésium, alanates, borohydrures,...) ne peuvent désorber rapidement l'hydrogène qu'en présence d'espèces additives qui jouent un rôle de catalyseur de la réaction. Il est donc très important de mener l'étude des procédés catalytiques (catalyseurs et/ou activateurs) et des énergies associées au stockage ou à la production d'hydrogène. Ceci demande la mise en œuvre de techniques calorimétriques et d'analyse thermique afin d'étudier les cinétiques de décomposition ou de réaction, la réversibilité des réactions et de déterminer les énergies d'activation de divers procédés de production d'hydrogène (hydrolyse des borohydrures, décomposition, réversibilité et cyclage des hydrures métalliques et alliages de structure cubique centrée, reformage catalytique). La caractérisation physicochimique avant et après réaction des catalyseurs et/ou activateurs impliqués dans ces processus fait partie intégrante des objectifs pour accéder au mécanisme réactionnel.

2. Identification des acteurs académiques et industriels

Les acteurs académiques du GdR ACTHYF sont répartis dans 30 laboratoires rattachés à 5 Instituts du CNRS : Chimie (INC), Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS), Sciences de l'Univers (INSU), Physique (INP), Sciences Biologiques (INSB).

Les autres partenaires institutionnels sont le CEA, l'IFP, l'INERIS et l'ADEME.

Les acteurs industriels du domaine de l'hydrogène sont : Air Liquide, Total, BIC, GDF-Suez, Veolia, PSA, Renault (liste non-exhaustive).

3. Analyse de la structure de recherche : forces et faiblesses

- ▀ De très nombreuses compétences d'excellent niveau international dans tous les domaines scientifiques mentionnés précédemment (production, stockage, modélisation, transport)
- ▀ Une structuration en réseau maintenant bien établie : 3 GdR : ACTHYF, BIO-H2, PACTE
- ▀ Une très bonne participation auprès de l'ANR avec 15 labellisations sur PAN-H et H-PAC (H2PAC, HYBOU, APH, CATHY, SIPOPAC, CASTAFHYOR, ALHAMO, ECOTRANSHY, HYPE, MATHYSSE, METALICA, MODERNHY-T, ENDEMAT, CYRANO, OSIRHYS IV)
- ▀ Une bonne participation auprès des instances européennes (9 projets dans le FP6 et 1 FP7) : STORHY, NESSHY, CMA, HYCONES, SURMOF, MOFCAT, HYTRAIN, COSY, HYDROGEN, NANOHY) et internationales (IEA-HIA, IPHE), mais à renforcer
- ▀ Un transfert technologique entre recherche fondamentale et appliquée à améliorer
- ▀ Un espace pour la recherche purement fondamentale à ménager pour les sujets innovants et à risques.

4. Partenariats à privilégier et à renforcer

- ▶ Renforcer les structures transversales de type GdR ou PIE
- ▶ Mieux collaborer avec les EPICs acteurs du domaine : CEA, ADEME, IFP. L'alliance ANCRE est une avancée sur ce point dans laquelle le CNRS doit garder son rôle d'opérateur de recherche
- ▶ Participer aux instances décisionnelles de l'ANR. La contribution du CNRS ne l'est qu'au travers des personnes membres des différents comités
- ▶ Renforcer la présence des unités de recherche dans les plateformes H2 nationale et européenne (HyPAC, JTI N-ERGHY)
- ▶ Etre représenté dans les instances internationales de type IEA-HIA.

5- Quelques considérations pour terminer...

Si plusieurs pays font des efforts considérables dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustible, c'est parce qu'ils envisagent des applications industrielles de grande envergure à court et moyen terme. Dans ce domaine, la France ne semble pas aujourd'hui en mesure de développer des applications industrielles compétitives. La question sur la nécessité de définir au niveau national des priorités de recherche est donc posée.

De ce qui ressort de ce document, on peut affirmer sans ambiguïté qu'une grande partie des progrès et des percées technologiques attendues relèvent de compétences en chimie et plus généralement en matériaux. Il apparaît donc souhaitable d'inventorier nos forces nationales dans ces domaines et les compétences auxquelles nous pourrions avoir accès hors de France.

Enfin, notre retard en matière d'applications tient en partie à la faible implication de nos industriels. Ceci pourrait être du à l'absence d'une politique nationale claire dans le domaine de l'hydrogène et à une méconnaissance de nos très bons résultats de recherche. D'autres pays savent faire et le faire savoir (*ndlr*).



L'Energie Solaire : PV & Concentré

1. Le gisement solaire

Le soleil envoie dans l'espace une énergie qui est au niveau de la terre de l'ordre de 1300 W/m^2 . Une fois l'atmosphère traversée¹, la terre reçoit au niveau du sol à la verticale à midi, dans le cas idéal d'un temps clair et sec, de l'ordre de 1000 W/m^2 .

Au niveau mondial, compte-tenu de l'ensoleillement réel, l'énergie solaire reçue au sol en moyenne annuelle se monte à environ $75\,000 \text{ GTep}^2$ ou 0,9 milliards de TWh^3 . Cette énergie représente **6000 fois** la consommation mondiale annuelle actuelle d'énergie ($12,5 \text{ GTep}$).

Au niveau local, l'énergie annuelle reçue sur un plan horizontal va de 500 kWh/m^2 à la latitude de la Suède à $2\,500 \text{ kWh/m}^2$ à la latitude des tropiques, en passant par un ensoleillement moyen en France de $1\,300 \text{ kWh/m}^2$ (puissance équivalente : 150 W/m^2). Cette énergie reçue n'a également pas du tout la même composition -entre rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus- selon les latitudes: c'est respectivement de l'ordre de 25%-75% en Suède, de 50%-50% en France, et de 75%-25% sous les tropiques.

L'enjeu d'une exploitation directe plus massive de ce gisement solaire apparaît encore plus clairement quand on compare les potentialités théoriques brutes des énergies nouvelles plus conventionnelles, elles-mêmes indirectement d'origine solaire, à cette ressource brute ($75\,000 \text{ GTep}$) :

| | Potentialités mondiales | Part ressource solaire |
|-------------|-------------------------|------------------------|
| Hydraulique | 5 GTep | 0,0001 |
| Biomasse | 100 GTep | 0,001 |
| Eolien | 1 500 GTep | 0,02 |

Pour la France, le potentiel solaire annuel se monte en moyenne à $700\,000 \text{ TWh}$ ($1\,300 \text{ kWh/m}^2 \times 550\,000 \text{ Mm}^2$) ou 60 GTep , ce qui représente plus de 200 fois la consommation nationale en énergie primaire en 2007 (275 MTep) ou plus de 1000 fois la consommation nationale d'électricité (550 TWh). Bien sûr, on ne peut imaginer d'équiper en capteurs solaires qu'une partie du territoire et il faut tenir compte des rendements de conversion, qui vont actuellement selon les besoins à assurer de 10-15% (panneau PV) à 40% (chauffe-eau solaire). Toutefois, l'équipement de 1% de la superficie totale, soit la surface actuelle du bâti ($5\,500 \text{ Mm}^2$), suffirait déjà à couvrir tous nos besoins actuels d'électricité (550 TWh).

¹ L'atmosphère en réfléchit et en absorbe une partie.

² Tep : contenu énergétique d'une tonne de pétrole.

³ $1 \text{ GTep} = 11\,630 \text{ TWh}$

2. Les techniques solaires de production d'énergie

Le rayonnement solaire peut être converti directement en une autre énergie, soit en chaleur (procédés thermodynamiques et thermochimiques), soit en électricité (procédés photovoltaïques), ou soit en énergie chimique, typiquement de l'hydrogène (dissociation de l'eau par photocatalyse ou via une photosynthèse biomimétique) ou plus généralement des combustibles de synthèse, mais cette dernière option est encore très prospective.

On pourrait tout à fait inclure dans les techniques solaires toute production de biomasse n'entrant pas en compétition avec l'agriculture et les productions naturelles (ex: forêts) et représentant donc une véritable récupération additionnelle de l'énergie solaire.

Les recherches en cours portant sur des cultures industrielles de microalgues vont tout à fait dans ce sens. Cependant, la valorisation énergétique ne sera sans doute qu'une composante de l'économie d'ensemble de ces technologies car le rendement solaire sera à terme au mieux de 5 à 10% (autres composantes : séquestration CO₂, molécules organiques élaborées).

Pour les procédés classiques, thermiques et électriques, on distingue :

- ▀ les techniques solaires sans concentration du rayonnement, conçues avant tout pour doter les bâtiments, qu'ils soient résidentiels ou professionnels, de sources d'énergies intégrées (toitures, façades), via des capteurs plans fixes (chauffe-eau solaire, réfrigération solaire, panneau PV). Les mêmes panneaux PV sont en général également utilisés pour la génération de puissance dans des fermes photovoltaïques, éventuellement dotés d'un dispositif de suivi du soleil : ils sont alors en compétition avec le PV concentré, qui lui est dédié spécifiquement à la génération de puissance.
- ▀ les techniques solaires avec concentration du rayonnement, via des réflecteurs de formes diverses et mobiles (suivi du soleil), destinées à la génération de puissance électrique (fermes photovoltaïques) ou thermique (chaleur HT utilisée par des centrales solaires spécifiques, thermodynamiques ou thermochimiques, ou valorisée dans des procédés industriels).

Parmi toutes les applications possibles, une seule d'entre-elles, les systèmes de chauffe-eau et chauffage solaires de l'habitat, peut être considérée comme mature. Le rendement des systèmes récents est de l'ordre de 40%.

Toutes les autres applications à rendements solaires théoriques élevés, le PV non concentré et le solaire concentré, sont à des degrés divers de développement scientifique et technologique. Le PV non concentré est le seul à déjà bénéficier d'un marché en plein essor (+ 40% par an en moyenne), mais cet essor est encore largement tributaire de tarifs de rachats d'électricité subventionnés⁴.

En tout état de cause, les solutions PV directes commercialisées sont encore très loin des potentialités théoriques en rendement et en coûts. D'une part, les matériaux mis en œuvre actuellement ne sont pas du tout encore au niveau de leurs performances en laboratoire et à plus long terme, 2020-2050, l'ingénierie photonique devrait permettre de dépasser largement les limites intrinsèques de rendement de ces matériaux, dues au domaine d'absorption solaire très spécifique de chacun d'eux, en faisant en sorte d'exploiter la totalité du spectre solaire. D'autre part, s'agissant d'un marché encore très jeune, il y a encore d'importantes économies d'échelle en perspective.

Le PV concentré se caractérise par la combinaison d'une cellule à très haut rendement (25-30% avec les cellules tri-jonction AsGa) et d'un dispositif intégrant « suivi du soleil » et « concentration solaire » (typiquement 500 soleils), ce qui permet tout à la fois de valoriser pleinement l'énergie solaire concentrée et de réduire au maximum la ponction sur les matières premières (partie active de la cellule PV). Il s'agit d'installations complexes dont le coût unitaire est élevé, et dont l'économie suppose donc un niveau de concentration élevé.

⁴ En France, le tarif de rachat, garanti pendant 20 ans, se monte actuellement à 32,823 c€ en base, à 45,000 c€ en cas d'intégration simplifiée au bâti (ex : bâtiment agricole) et à 60,176 c€ en cas d'intégration complète au bâti.

Les centrales solaires thermodynamiques utilisent un fluide caloporteur (eau, huile, sels, ...) pour transférer à un générateur d'électricité (turbines conventionnelles à vapeur ou moteurs Stirling) la chaleur HT récoltée. L'hybridation avec une énergie fossile d'appoint (gaz surtout) et l'insertion dans le système d'un stockage de masse permettent de faire face à l'intermittence du solaire (maîtrise de la disponibilité en électricité).

Le stockage de masse de l'énergie thermique peut se faire de diverses manières, surtout sous forme de chaleur sensible (bétons, sables, déchets vitrifiés,...) ou sous forme de chaleur latente (sels fondus, paraffines,...). Le stockage de l'énergie sous forme de chaleur est beaucoup moins onéreux que sous forme d'électricité. Le coût d'un stockage thermique dans le béton (350 kWh à 390°C) est estimé à €20 / kWh en investissement et € 0,01 par kWh restitué⁵ contre respectivement 100 à 150 €/kWh en investissement et 0,15 à 0,30 €/kWh restitué pour des batteries au plomb.

Il y a quatre types de centrales solaires thermodynamiques à concentration permettant de produire de l'électricité à l'aide d'un cycle Sterling (systèmes paraboliques) ou d'un cycle Rankine (autres systèmes) et avec des niveaux de concentration spécifiques différents :

- ▀ Les systèmes paraboliques (C = 5 à 10 000 soleils), réservés aux petites puissances (≤ 50 kW), utilisent un miroir parabolique mobile qui concentre l'énergie solaire sur un moteur Stirling placé sur le point focal.
- ▀ Les centrales à tour (C = 1 000 soleils) utilisent un champ composé d'héliostats qui suivent le soleil dans sa course et concentrent ses rayons sur un récepteur central localisé au sommet d'une tour. Le récepteur transmet son énergie thermique à un fluide (eau, sels fondus, air). En France, la centrale à tour Thémis a été exploitée de 1984 à 1986.
- ▀ Les centrales cylindro-paraboliques (C = 50 à 150 soleils) utilisent des rangées parallèles de miroirs de forme cylindro-parabolique qui concentrent les rayons du soleil sur des tubes linéaires contenant un fluide caloporteur. Le fluide caloporteur, généralement une huile synthétique, est pompé à travers une série d'échangeurs de chaleur pour produire une vapeur à très haute température.
- ▀ Les centrales à concentrateurs linéaires de Fresnel (C = 50 à 100 soleils) sont d'un fonctionnement d'ensemble identique à celui des centrales cylindro-paraboliques, mais utilisent un système optique plus simple, constitué de miroirs plans (plats) proches du sol capables de pivoter en suivant la course du soleil tout en concentrant le rayonnement, via un miroir secondaire, sur un tube récepteur linéaire. Les systèmes pilotes actuels sont tous à production directe de vapeur.

Les **centrales solaires thermiques à flux très concentré**⁶ (C = 3 000 à 10 000 soleils), qui pourrait notamment rendre possible la production d'hydrogène ou de combustibles de synthèse via un cycle thermochimique, sont encore à un stade de recherche très amont. La France dispose dans ce domaine d'un équipement unique au monde (four solaire d'Odeillo).

⁵ D. Laing et al., Solar Energy 80 (2006) 1283–1289.

⁶ Fours solaires ou centrales à tour avec surconcentrateur.

3. Le solaire PV et concentré : La problématique économique générale

Les technologies solaires requises pour sous-tendre un système énergétique propre et durable s'inscrivent fondamentalement dans un réseau de contraintes extrêmement sévères qui, volens nolens, freinent leur développement industriel et commercial.

Les contraintes solaires spécifiques

L'énergie solaire, en un point quelconque du globe, est une source d'énergie par nature mobile (parcours est-ouest dans une journée) et fluctuante : intermittence jour/nuit, inter-saisonnalité hiver/été et discontinuité aléatoire (passages nuageux). En comparaison des énergies fossiles, c'est de plus une énergie intrinsèquement diluée⁷.

Le problème est donc non seulement d'intercepter et de convertir une énergie venant d'une source mobile et fluctuante, mais aussi de la concentrer à un moment ou un autre, soit en amont, au niveau du rayonnement reçu, soit en aval, après la conversion énergétique. L'exploitation de cette énergie implique donc en règle générale, pour assurer un service énergétique de qualité dans des conditions économiques acceptables, la mise au point de systèmes complexes intégrant notamment un stockage de masse performant et, le plus souvent, un système de contrôle-commande très fin et très fiable.

Le facteur de charge⁸ est typiquement de 15% pour le PV non concentré, de 25% pour les centrales électriques solaires sans stockage, de 30% pour le PV non concentré avec suivi du soleil, et de 40% à 70% pour les centrales électriques solaires avec stockage de masse intégré⁹.

Toutes les filières solaires font face à ces contraintes, chacune avec de fortes spécificités, mis à part très partiellement les systèmes de chauffe-eau solaires : ils intègrent naturellement un stockage adapté (eau chaude), mais le contrôle-commande du système est contrairement aux apparences une problématique complexe¹⁰.

Les contraintes de développement durable

Dans une perspective de minimisation des impacts environnementaux et de raréfaction des ressources naturelles, l'arbitrage entre les différentes solutions technologiques sera avec le temps de plus en plus déterminée par les **performances globales anticipées du cycle de vie complet** tant pour l'énergie (rendement net en E de la transformation/conversion) que pour les matières premières (niveau de disponibilité des MP mises en œuvre, y c. le recyclage).

A cet égard, les centrales solaires thermodynamiques présentent d'ores et déjà la perspective d'un cycle de vie très favorable, avec notamment un retour sur investissement « énergétique » de environ six à douze mois comparé à une durée de vie de l'ordre de 25 ans, et aucune ponction significative sur les ressources rares en MP, y compris pour le stockage thermique avec les solutions en cours de développement. Bien sûr, cette voie n'en présente pas moins un certains nombre de points durs¹¹.

⁷ Il faut en moyenne toute une journée pour recueillir sur une surface de 1 m² exposée au sud l'équivalent de quelques kWh. Comparativement, un litre d'essence a un contenu énergétique correspondant à 12 kWh.

⁸ Rapport entre la production effective et la capacité de production en régime nominale pendant une année entière, jour et nuit, soit au total pendant 8760 heures.

⁹ Des centrales avec des facteurs de charge de 100%, moyennant un volume de stockage plus conséquent et un appoint fossile, sont tout à fait envisageables (contexte d'une production d'électricité en base fortement valorisée).

¹⁰ Sauf pour les thermosiphons directs en usage sous les tropiques.

¹¹ La filière cylindro-parabolique est notamment confrontée à un problème de compatibilité « système » entre les huiles utilisées comme caloporteur qui sont inflammables, et les sels fondus (nitrates) utilisés usuellement comme matériau de stockage, qui sont eux des comburants puissants.

Toutefois, les solutions durables ne sont le plus souvent pas accessibles immédiatement et la dynamique de départ permettant de créer progressivement le marché doit faire appel à des **solutions** « **start-up** », non durables en termes d'énergie et/ou de matières premières, mais plus aisées à mettre en œuvre pour nourrir un marché solvable dans une période transitoire, plus ou moins longue selon les domaines d'application.

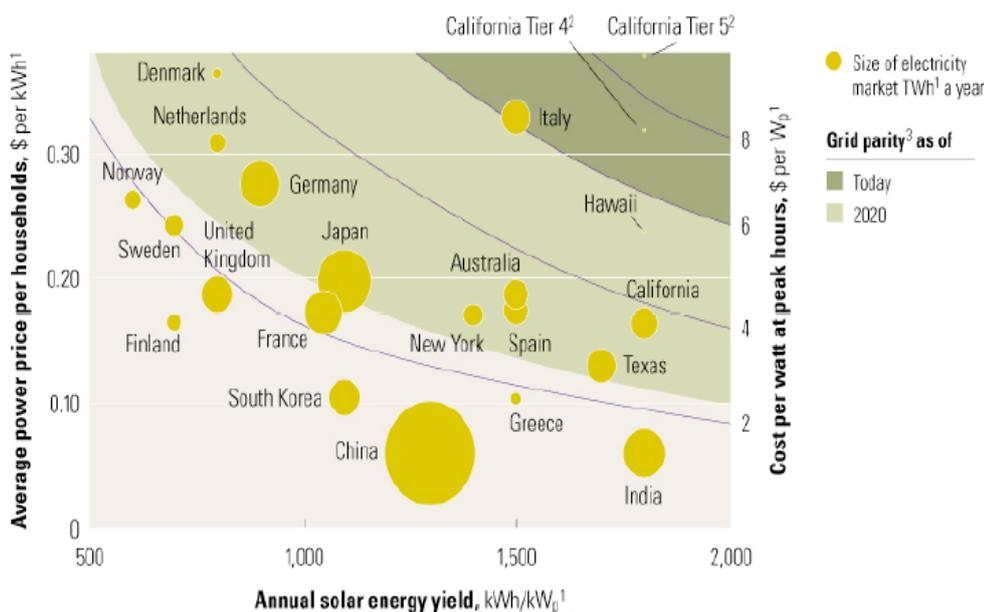
Les solutions à LT de massification de l'utilisation de l'énergie solaire seront sans doute celles qui présenteront, à toxicité donnée, les plus faibles empreintes E et MP, si possible qui s'abstiendront de toute utilisation d'éléments rares et énergivores.

Les contraintes économiques spécifiques

Les technologies solaires qu'il faut concevoir et développer doivent lutter contre des technologies existantes, établies de longue date (système énergétique actuel), qui bénéficient donc d'un effet d'expérience colossal et qui, de plus, continuent à faire des progrès considérables grâce notamment aux potentialités ouvertes par les TIC (ex: efficacité énergétique sans cesse accrue des moteurs essence et diesel dans l'industrie automobile).

Typiquement, l'ambition des filières solaires dédiées à la production d'électricité (PV concentré ou non ; centrales thermodynamiques) ne peut être que de relever le défi de la « parité réseau » sans subvention. Bien entendu, le défi n'est pas le même selon l'endroit où l'on se situe dans le réseau :

- Les systèmes photovoltaïques équipant un bâtiment (toiture, façade) doivent avoir un coût de production comparable au tarif de détail TTC de l'électricité achetée au réseau par le propriétaire du système qu'il soit dans le secteur résidentiel, tertiaire ou industriel. Ce prix de l'électricité varie énormément d'un pays à l'autre : France (8,5 c€/kWh), Italie : (20 c€/kWh), Californie (jusqu'à 45 c\$/kWh selon les heures). De ce fait, la compétitivité du photovoltaïque en toiture/façade se produira en premier dans les régions combinant prix élevé de l'électricité au niveau du détail et ensoleillement fort. L'industrie estime que la compétitivité du photovoltaïque pourrait être atteinte d'ici 2 à 3 ans en Italie.



¹kWh = kilowatt hour; kW_p = kilowatt peak; TWh = terawatt hour; W_p = watt peak; the annual solar yield is the amount of electricity generated by a south-facing 1 kW peak-rated module in 1 year, or the equivalent number of hours that the module operates at peak rating.

²Tier 4 and 5 are names of regulated forms of electricity generation and usage.

³Unsubsidized cost to end users of solar energy equals cost of conventional electricity.

Source: CIA country files; European Photovoltaic Policy Group; Eurostat; Pacific Gas & Electric (PG&E); Public Policy Institute of New York State; McKinsey Global Institute analysis

(source : McKinsey)

- ▀ Les centrales avec un stockage de plusieurs heures peuvent fournir de la puissance à des périodes où l'énergie solaire n'est pas disponible. De ce fait, elles pourront être utilisées en écrêtement de pointe journalière, i.e. en semi-base. Dans ce cas, le coût de production de l'électricité solaire peut se comparer en première approche au coût de production des moyens de semi-base, par exemple des centrales à cycles combinés gaz.
- ▀ Les centrales sans stockage, ou avec un petit stockage tampon destiné au lissage, ne peuvent pas se comparer directement aux autres types de centrales qui injectent de l'électricité au réseau du fait de l'intermittence. Une étude préalable de l'insertion de cette production dans le mix énergétique et de l'évaluation du service rendu est nécessaire. Dans ce cas, atteindre la compétitivité de l'électricité « réseau » nécessite des ruptures technologiques significatives.

Ces différentes « marches technologiques » à franchir devraient cependant s'alléger à MT avec le renchérissement inéluctable des prix de marché de l'énergie (raréfaction énergies fossiles, taxe CO2 de plus en plus pénalisante). Dans l'immédiat, le niveau des politiques nationales de soutien aux énergies solaires¹² restera déterminant pour leur développement.

L'état de développement des filières sur le marché

Une seule filière, celle des systèmes de chauffe-eau et chauffage solaires de l'habitat, peut être considérée comme mature. La capacité mondiale installée fin 2008 était de près de 170 GW_{th}, dont 20 GW_{th} dans l'UE. Le rendement des systèmes récents est de l'ordre de 40%.

Parmi les autres filières solaires, le marché du **PV non concentré** connaît de loin l'essor le plus vigoureux, avec des taux de croissance annuel moyen de l'ordre de + 40% ces dernières années. Même si cette filière ne représente guère aujourd'hui que de l'ordre de 0,1% de la production d'électricité mondiale, l'industrie photovoltaïque mondiale a réalisé en 2008 un chiffre d'affaires hors installation de 12 milliards € environ et le parc installé fin 2008 est de l'ordre de 15 000 MW. En comparaison, l'industrie photovoltaïque française a réalisé en 2008 un chiffre d'affaires de 200 millions € environ et le parc installé se limite fin 2008 à 175 MW.

Le PV non concentré, hormis l'application aux sites isolés, a pu déjà prendre une telle place sur le marché car il a pu jusqu'à présent faire l'impasse dans une certaine mesure sur les contraintes techniques et économiques : 1) Les réseaux d'électricité existants peuvent absorber sans trop de problème les productions aléatoires distribuées tant que globalement elles restent dans une certaine limite¹³. 2) L'essor est largement tributaire de tarifs de rachats d'électricité subventionnés¹⁴ permettant d'assurer une rentabilité suffisante face à des énergies fossiles encore trop bon marché.

La dépendance à des tarifs d'achat subventionnés devrait s'estomper progressivement, au fur et à mesure des progrès technologiques et de l'augmentation du nombre de pays et de régions où le prix de revient du photovoltaïque devient inférieur aux prix de l'électricité distribuée, source alors de ventes plus massives et donc d'économies d'échelle.

Une absorption plus massive par les réseaux des applications PV tertiaires et résidentielles nécessitera la mise au point de systèmes de gestion prédictive de la demande¹⁵ (solution a priori la moins coûteuse), associés si le contexte économique le permet à des systèmes de stockage d'électricité adaptés (solution rapidement plus coûteuse).

Le marché du **solaire PV concentré** (concentration typique de 500 « soleil » sur une cellule photovoltaïque à très haut rendement) commence lui tout juste à émerger, mais la dynamique semble déjà très forte. En effet, les perspectives actuelles du PV concentré en termes de parcs installés cumulés sont de 50 MW en 2009 et de 100 MW en 2010 (parcs allant de quelques centaines de kW à quelques MW), contre seulement 15 MW en 2008.

¹² Ce soutien s'exerce actuellement à deux niveaux en France : tarifs de rachat subventionné de l'électricité produite ; crédits d'impôts incitatifs pour l'équipement des ménages.

¹³ Jusqu'à 10-20% maximum du parc total semble-t-il, en l'état actuel des choses.

¹⁴ En France, le tarif de rachat, garanti pendant 20 ans, se monte actuellement à 32,823 c€ en base, à 45,000 c€ en cas d'intégration simplifiée au bâti et à 60,176 c€ en cas d'intégration complète au bâti.

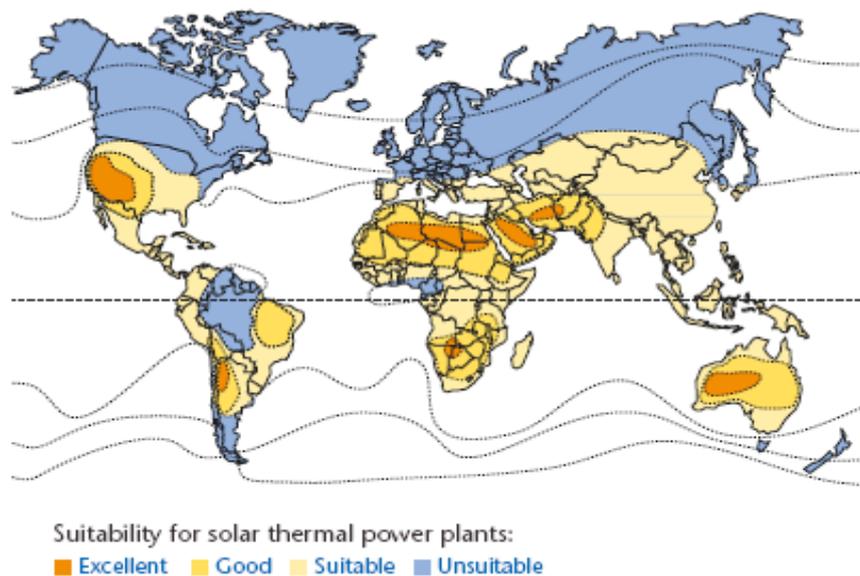
¹⁵ Concept de réseaux « intelligents ».

Le marché des **centrales solaires thermodynamiques** commence lui aussi tout juste à émerger, autour de quatre technologies : systèmes paraboliques pour les petites puissances (≤ 50 kW), centrales à tour, centrales cylindro-paraboliques et centrales à concentrateurs linéaire de Fresnel pour les grandes puissances (10 à 200 MW).

Les centrales cylindro-paraboliques sont un peu à part. Un parc de 354 MW installés dans le désert des Mojave (USA) dans les années '80 a accumulé 9 milliards de kWh de production et démontré une très bonne fiabilité sur 20 ans d'opération. En dépit de ce solide bilan, un véritable déploiement commence tout juste à voir le jour, mais suivi de près maintenant par celui des centrales à tour. Les deux autres types de centrales solaires sont encore au stade de la démonstration. Les centrales à concentrateurs Fresnel, de plus faible rendement, de l'ordre de 10%, du fait de l'utilisation de réflecteurs plans, pourraient constituer une alternative à faible coûts comparées aux trois autres options (les réflecteurs sont des miroirs convexes).

Les **centrales solaires thermiques à flux très concentré**¹⁶ ($C = 10\ 000$ soleils), qui pourrait notamment rendre possible la production d'hydrogène ou de combustibles de synthèse via un cycle thermochimique, sont encore à un stade de recherche très amont. La France dispose dans ce domaine d'un équipement unique au monde (four solaire d'Odeillo).

Sur le plan général, la **production d'énergie par les techniques de concentration nécessite un fort ensoleillement direct, ce qui limite globalement son déploiement à des régions au ciel limpide (peu de nébulosité et de pollution) de latitude $< 40^\circ$ dans les deux hémisphères, Nord et Sud**. Ci-après une carte mettant en relief les zones se prêtant bien au solaire concentré, aux conditions économiques actuelles :



Cette ceinture solaire inclut de nombreuses zones de grande densité de population : le sud de l'Europe, le sud des États-Unis et certaines parties des autres régions concernées (Inde, Chine, Afrique du nord, Moyen-Orient, Australie).

Les zones moins peuplées pourraient de leur côté s'équiper tout autant et devenir alors exportatrices d'électricité au profit de régions moins favorisées (par exemple, de l'Afrique du Nord vers l'Europe).

¹⁶ Fours solaires ou centrales à tour avec surconcentrateur.

Dans cet esprit, le Plan Solaire Méditerranéen envisage à l'horizon 2020 la construction en Afrique du Nord et au Moyen-Orient d'une puissance totale de 20 GW de sources d'énergie renouvelables dont 13 à 16 GW en solaire concentré (PV et thermodynamique).

L'Allemagne, qui est en flèche sur les questions solaires, a lancé en juillet 2009, sous l'égide de Munich Ré et de la DLR, une initiative -« Desertec »- censée donner corps au Plan Solaire Méditerranéen. L'agenda de Desertec prévoit de fournir d'ici trois ans des " plans d'investissement réalisables" pour la création d'un réseau de centrales solaires. L'objectif est de couvrir à terme 15% des besoins énergétiques de l'Europe en plus de ceux des pays producteurs.

Les rendements de conversion actuels et imaginables à **moyen terme (2025)** de systèmes complets issus d'une production industrielle (rendement moyen sur la durée de vie) sont les suivants :

| | Rendement actuel | Rendement à moyen terme |
|--------------------------------|------------------|-------------------------|
| Solaire non concentré | | |
| -photovoltaïque | 5-18% | 10-25% |
| -thermique ¹⁷ | 40% | 45-70% |
| Solaire concentré | | |
| -photovoltaïque ¹⁸ | 20-22% | 28-30% |
| -thermodynamique ¹⁹ | 15-20% | 25-30% |
| -thermochimique ²⁰ | - | 25-30% |

Bien entendu, les prix de revient de l'énergie solaire dépendent également très largement du potentiel solaire local, lui-même en premier lieu déterminé par la latitude du site. Concernant la production d'électricité, les régions européennes méridionales, comme l'Andalousie (Espagne) ou le Péloponèse (Grèce), présentent tout naturellement les prix de revient les plus bas en Europe. Leur niveau dans ces régions est actuellement de l'ordre de 25 c€/kWh tant pour le photovoltaïque domestique que pour le solaire concentré.

L'autre débouché majeur à terme de l'énergie solaire -la production de chaleur HT pour couvrir les **besoins en énergie thermique des procédés industriels**-, aujourd'hui inexistant, attend son heure : un rapport récent de l'Agence International de l'Energie²¹ estime que 25% des besoins des procédés industriels nécessitent une chaleur moyenne (100°C à 400°C) et 45% une chaleur supérieure à 400°C, le marché potentiel pour l'Europe s'élevant à 100-125 GW.

¹⁷ A moyen terme, les gains de rendement proviendront avant tout de la disponibilité d'un stockage thermique intersaisonnier économique permettant de stocker l'énergie en surplus de l'été au lieu de la perdre par convection.

¹⁸ Données pour les systèmes III-V type AsGa en multi-jonction (tri-jonction aujourd'hui).

¹⁹ Données pour les centrales cylindro-paraboliques et à tour.

²⁰ Rendement donné pour une installation dédiée production d'hydrogène.

²¹ "Potential for Solar Heat in Industrial Processes," C. Vannoni et al., 2008

4. Filières PV :

Etat de l'art dans le monde, scientifique et technologique

C'est le silicium cristallin ultra-pur de l'industrie des semi-conducteurs qui a donné au photovoltaïque son élan initial, avec comme premier marché le spatial à la fin des années 50. Après le premier choc pétrolier (1973), le marché a véritablement décollé rendant possible des économies d'échelle en cascade et des augmentations continues de rendements²², mais aussi stimulant la recherche de solutions permettant de s'affranchir des techniques très coûteuses de l'industrie électronique (élaboration très énergivore²³ d'un matériau ultra-pur, procédé discontinu, traitement en salles blanches) et du silicium cristallin lui-même, qui ne peut fonctionner valablement qu'en couche épaisse (50µ minimum).

La **recherche en rupture** sur le silicium cristallin lui-même est multiple (ex : utilisation d'un silicium de qualité métallurgique, cristallisation directe par tirage de ruban ou moulage du silicium), mais aucune des pistes envisagées n'a encore vraiment atteint une maturité suffisante pour une application massive.

La **recherche en rupture** s'est aussi très rapidement tournée vers des matériaux élaborables à plus basse température (500-600°C maximum), capable de fonctionner en couches minces et pouvant se prêter à des procédés à haut débit sur de grandes surfaces (division des coûts). La **première vague de recherche** a porté sur les **films minces inorganiques** (épaisseur : qq µ), avec trois filières : Silicium amorphe²⁴, CIGS, CdTe, qui ont maintenant bien pris leur envol sur le plan industriel. En fait, une filière couche mince dite « AsGa » pré-existait, issue comme le silicium cristallin de l'industrie micro-électronique: elle s'était développé en même temps, présentait un rendement comparativement supérieur, mais était d'un coût intrinsèquement très supérieur²⁵ ce qui lui a interdit les applications autres que spatiales. Depuis peu, cette filière s'ouvre le marché du PV concentré avec ses versions tri-jonction : le niveau de concentration couramment utilisé dorénavant (500 « soleil ») rentabilise ces cellules très haut rendement²⁶ en dépit de leur sophistication poussée.

La **deuxième vague de recherche**, initiée dans les années 90, tente de mettre en œuvre des composés organiques, polymères ou petites molécules, avec la perspective de films encore plus minces (dix fois moindre), pouvant être déposés à température ambiante et se prêtant a priori encore mieux à des méthodes de production à forte productivité (technique d'impression offset ou jet d'encre). Cette voie, très jeune et aux fortes potentialités, n'a pas encore la maîtrise requise pour pouvoir combiner des niveaux élevés de rendement et de durée de vie dans des produits industriels face aux films minces inorganiques, mais peut d'ores et déjà trouver un débouché dans des applications récréatives valorisant pleinement ses propriétés (systèmes ultra-légers et conformables assurant un minimum d'énergie aux appareils portables).

Les **films minces organiques** reposent sur des concepts récents, mis en évidence au début des années 90. Comparé à l'inorganique, les jonctions PV sont toutes des hétérojonctions car l'électronique organique ne sait pas faire des matériaux de type P et N respectivement par dopage d'un même composé organique. D'autre part, les excitons créés ont une énergie de liaison bien supérieure et leur distance de diffusion avant recombinaison est de l'ordre de 10 nm seulement, ce qui implique des configurations permettant de créer les excitons dans un rayon de 10 nm de l'interface P-N, sans quoi, faute d'un champ électrique suffisant, la séparation des charges a peu de chances de se produire. Enfin, autre difficulté, ce rayon de 10 nm est largement insuffisant pour assurer une bonne absorption optique (les matériaux organiques requièrent en général une épaisseur de 100 nm environ).

²² Le rendement en laboratoire se limitait à l'époque à 15% environ (limite théorique: 32%).

²³ La température d'élaboration du silicium cristallin est de l'ordre de 1 400°C.

²⁴ Cette filière comprend les cellules à base strictement de silicium amorphe et toutes les versions plus évoluées, réalisées sur les mêmes principes de base, dont les cellules « microcristallines » et les cellules « micromorphes ».

²⁵ Le matériau fait appel à des matières premières rares (Ga, Ge, In) et son élaboration est très complexe.

²⁶ Ces cellules AsGa multi-jonction atteignent 40% en laboratoire et ont semble-t-il comme perspective à court terme 30% en application commerciale (fermes solaires).

Les rendements de conversion, au départ dérisoires, ont décollé et atteignent maintenant couramment quelques pourcents, 5-7% pour les meilleures cellules, grâce à la découverte d'une architecture ad hoc conciliant toutes ces contraintes: matériaux interpénétrés sur une épaisseur de l'ordre de 100 à 200 nm avec des domaines élémentaires d'une dizaine de nanomètres de diamètre (distribution en volume de l'hétérojonction).

Les films minces organiques ont aussi une problématique « durée de vie » très spécifique lié à la dégradabilité intrinsèque des composés organiques aux agents atmosphériques (UV, O₂, vapeur d'eau) et aux problèmes de stabilité des interfaces entre la couche active organique et les électrodes inorganiques (oxydes, métaux).

Des **voies intermédiaires dites « hybrides »**, associant inorganique et organique se sont également fait jour parallèlement, fondées sur le même concept de matériaux interpénétrés, mais sur des épaisseurs plutôt comparables à celles des films minces inorganiques (qq μ) et faisant appel à une « mécanique » électronique interne assez spécifique.

L'option la plus avancée à ce jour est la cellule à colorant de Grätzel, qui associe du TiO₂ nanocristallin à des colorants organiques jouant le rôle de phase photoactive. Les rendements en laboratoire sont déjà élevés (11%), mais ce type de cellule connaît également des problèmes spécifiques de durée de vie. Cependant, l'applicabilité commerciale semble en bonne voie, avec les mêmes débouchés initiaux que pour les films minces organiques (applications récréatives).

Les deux filières organiques et hybrides, en dépit de leurs différences, reposent en fait sur les mêmes disciplines de base et donc sur la même communauté scientifique : la chimie, l'électronique et la photonique des nanomatériaux.

L'ensemble de ces films minces -inorganiques, organiques ou hybrides-, du fait de leur élaboration à basse température, ont l'avantage de pouvoir être déposés sur des supports bon marché, soit rigides comme le verre, soit flexibles comme l'acier inox ou des feuilles plastiques (ex: polyimides).

Sur le plan général, la quête vers de plus haut rendement passe pour l'instant par des **solutions multi-jonction**, soit interne à une filière (ex: CIGS, PV organique), soit hybride (ex: Si cristallin/Si film mince), pour exploiter les complémentarités spectrales.

Dépassé un certain seuil de rendement (PV non concentré : 25%), il faudra sans doute faire appel également à toute la panoplie de l'**ingénierie photonique** ouverte par la nanostructuration des matériaux. Il s'agira d'exploiter à fond tout le spectre solaire en faisant en sorte que chaque radiation engendre un maximum d'électrons. Cette perspective sera a priori de nature à relancer la compétition d'ensemble entre toutes les filières car la nanostructuration permet d'envisager d'agir en couches très minces, même pour le silicium cristallin.

Sur le plan économique, l'ambition des filières PV en place (Si cristallin, Si film mince, CIGS, CdTe, AsGa) est de relever le défi de la « parité réseau » sans subvention, chacun dans son ou ses domaine(s) de prédilection (PV direct ou PV concentré).

L'objectif généralement affiché à moyen terme pour le **PV direct** est de descendre pour le prix des modules sous la barre d'un euro/W_c. Pour fixer les idées, un module de durée de vie de 25 ans et de rendement moyen de 15% aurait la capacité d'être compétitif avec un tarif de réseau de l'ordre de 15 c€/kWh si le prix du module était de 1 €/W_c et le prix du système installé 2 €/W_c. La comparaison avec les prix actuels, qui sont respectivement de 2,5 €/W_c et de 4 €/W_c dans les pays où le marché est mature, montre le chemin à parcourir²⁷.

²⁷ Les meilleurs modules en Si cristallin assurent aujourd'hui tout à fait 15% de rendement moyen sur la totalité de la durée de vie.

L'état de l'art en termes de rendement moyen²⁸ des cellules (laboratoire) et des modules (industrie) semble être le suivant, sachant que les durées de vie de l'inorganique sont de l'ordre de 20-25 ans et que celles des filières organique/hybride sont à ce jour encore très limitées :

| | Niveau théorique | Laboratoire | Industrie 2009 | Industrie 2025 |
|---------------------|------------------|-------------|----------------|----------------|
| Si mono-c | 30% | 25% | 14-21% | 25% |
| Si multi-c | 30% | 20% | 13-15% | 20% |
| Si amorphe | 22% | 10% | 6-9% | 13% |
| CIGS | 30% | 20% | 10-12% | 18% |
| CdTe | 30% | 17% | 8-10% | 15% |
| AsGa simple* | 30% | 29% | 19% | ? |
| AsGa tandem* | 49% | 41% | 38-39% | 48% |
| PV hybride | 30% | 11% | ? | 15% |
| PV organique | 30% | 7% | 4% | 10% |

(*) Les rendements actuels de AsGa simple et tandem ont été obtenus respectivement avec des concentrations de 230 soleils et 450 soleils. AsGa tandem est en 2009 une tri-jonction sous 450 soleils et en 2025 typiquement une quadri-jonction sous 2 000 soleils.

En termes de développement durable, à l'égard d'un cahier des charges requérant des matériaux ayant une faible empreinte énergétique et faisant appel à des éléments chimiques abondants, la situation actuelle est la suivante :

| | Empreinte E ²⁹ | Éléments rares | Durée de vie |
|--------------------------|---------------------------|----------------|--------------|
| Si mono-c | 3,5 | Ag | 25 ans |
| Si multi-c | 3,0 | Ag | 25 ans |
| Si amorphe | 1,0 | In | 25 ans |
| CIGS | 1,0 | In | 25 ans |
| CdTe | 1,5 | Te | 25 ans |
| AsGa tri-jonction | 1,0 | Ga, Ge, In, Au | 25 ans |
| PV hybride | 1,0 | In, Pt, Ru | 5 ans |
| PV organique | 1,0 | In | 5 ans |

Bien évidemment, ces bilans sont très approximatifs. En particulier, celui des couches minces est tributaire des substrats « support » utilisés, selon l'épaisseur mise en œuvre, couche épaisse (verre) ou couche fine (acier inox, feuille de polymère) et selon le caractère énergivore en volume du matériau (l'acier est deux fois plus énergivore par unité de volume que le verre et les feuilles de polymère).

Un bilan global doit bien évidemment aussi inclure l'ensemble des risques courus tout au long du cycle de vie complet des produits. Il y a surtout des risques « process » en amont (manipulation en atelier de substances dangereuses) et des risques « process » en aval (fin de vie mal maîtrisée d'un produit dont des éléments constitutifs peuvent être sources de toxicité).

Les risques ne sont jamais nuls, mais ils sont difficiles à évaluer objectivement et il est encore plus difficile de les comparer entre eux.

Néanmoins, les solutions PV à LT de massification de l'utilisation de l'énergie solaire seront sans doute celles qui présenteront, à dangerosité/toxicité donnée³⁰, les plus faibles empreintes E et MP, si possible qui s'abstiendront de toute utilisation d'éléments rares et énergivores.

²⁸ Rendement moyen calculé sur la durée de vie des cellules et modules.

²⁹ L'empreinte énergétique est exprimée en nombre d'années de fonctionnement requises pour rembourser la dépense énergétique totale de fabrication de la cellule, y c. l'énergie consommée pour l'extraction des matières premières utilisées, en prenant comme référence l'ensoleillement moyen annuel de la France (1 300 kWh/m²).

³⁰ Niveau global de risque qu'on accepte.

5. Filière thermique concentré : Etat de l'art dans le monde, scientifique et technologique

Suite au choc pétrolier de 1973, plusieurs centrales solaires expérimentales ont vu le jour au début des années 80, telles que *Thémis* en France (1983-1986) et *CESA 1* en Espagne, et un premier déploiement industriel a été amorcé aux USA avec les neuf centrales solaires SEGS en exploitation dans le désert de Mojave en Californie depuis plus de 20 ans. Ces dernières représentent une capacité totale installée de 354 MW_e, répartie en 9 tranches de 30 MW_e à 80 MW_e, et produisent 800 GWh_e/an.

Le gros des efforts engagés ont été stoppés environ dix ans plus tard compte-tenu de la chute des prix des combustibles fossiles (contre-choc pétrolier) et de l'arrêt des politiques incitatives : aucune nouvelle centrale solaire n'a été construite dans le monde durant 20 ans (la France a arrêté tout effort de R&D dans ce domaine dès 1985). Malgré tout, deux pays européens, l'Allemagne (DLR) et l'Espagne (CIEMAT), ont continué -avec l'aide de la DG-R (UE) et de leurs gouvernements nationaux- les recherches sur les composants et systèmes, en particulier dans le cadre de la plateforme solaire espagnole d'Almería (PSA, CIEMAT).

Au début des années 2000, la menace du réchauffement climatique a modifié radicalement la vision à long terme des ressources d'énergie primaire à mobiliser en privilégiant les ressources à faible (ou négligeable) contenu en carbone. L'énergie solaire est donc de nouveau apparue comme une solution salvatrice et son déploiement a été (et est) encouragé par des mesures d'accompagnement telles que les tarifs garantis de rachat, les crédits d'impôts ...

La filière photovoltaïque a été la première à bénéficier de ces politiques volontaristes car facile à mettre en œuvre au niveau individuel. La filière thermique concentré a été plus longue à émerger car plus mobilisatrice de capitaux, la taille unitaire des installations étant de l'ordre de la dizaine de MW (sauf pour les systèmes paraboliques) au lieu de quelques kW pour le PV. Le signal de départ a été donné par le gouvernement espagnol, qui a mis en place en 2005-2007 un tarif de rachat rentabilisant ce type de centrale dans les conditions climatiques de l'Espagne.

Ainsi, les industriels espagnols et allemands ont pu capitaliser leurs efforts de R&D consentis pendant la période de « vache maigre » en réalisant rapidement les projets qui sommeillaient dans les cartons depuis plusieurs années. Le résultat est impressionnant, la première centrale solaire commerciale européenne (*PS10*, technologie à tour de 11 MW_e) a été mise en service en 2007 près de Séville et la centrale *PS20* en 2009 sur le même site. Cette même année la centrale *ANDASOL 1* (50 MW_e, technologie cylindro-parabolique, stockage sur sel fondu de 7,5h à pleine puissance) a été couplée au réseau près de Grenade. Aujourd'hui, 34 centrales sont en construction en Espagne pour une puissance cumulée de 1417 MW_e (831 MW_e seront couplés au réseau en décembre 2010) et 12 GW_e sont en projet³¹.

Les USA ont également décidé de s'engager dans le développement des centrales solaires thermodynamiques. La centrale *Nevada Solar One* (64 MW_e, cylindro-paraboliques) a été achevée en 2007 et environ 9 GW_e sont en projet. L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) prend maintenant sérieusement en compte l'option CSP³² dans ses scénarios énergétiques et prévoit une contribution égale des filières PV et CSP au bilan énergétique mondial en 2050.

Sur le plan technico-économique, **cette filière est très bien adaptée à l'hybridation avec les énergies fossiles ou la biomasse**³³. Les solutions actuelles ne permettent cependant pas une grande flexibilité : l'appoint fossile dans une centrale solaire est limité à 15%-25% et dans le cas inverse (centrales dites ISCCS³⁴), l'appoint solaire se limite à 10% environ.

L'option prospective d'un appoint dans le cycle à très haute température -chambre à combustion d'une turbine à gaz- d'un cycle combiné (concept en développement à travers le projet PEGASE par exemple), l'apport solaire pourra varier de 20% à 90% selon l'option retenue de fonctionnement de la centrale.

³¹ Conférence SolarPACES2009, 15-18 septembre 2009, Berlin, Allemagne.

³² Concentrated Solar Power.

³³ L'explication est donnée en bas de la page 13.

³⁴ Integrated Solar Combined Cycle System.

L'état de l'art est le suivant, avec en fin de tableau, à titre indicatif, la perspective de rendement moyen annuel à MT (2025) :

| | Systèmes paraboliques | Centrales à tours | Centrales cylindro-paraboliques | Centrales concentrateur Fresnel |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Maturité de la filière | Au stade pilote (10 unités) | 11 MWe en exploitation | 355 MWe en exploitation | Au stade pilote |
| Puissance des unités actuelles | 5 à 25 kWe | 10 à 20 MWe | 30 à 80 MWe | 5 MWe |
| Concentration | 2 000 à 10 000 S | 1 000 à 2 000 S | 100 à 500 S | 100 à 500 S |
| Caloporteur et sa température | He ou H ₂ : 600 à 1200 °C | sels fondus : 400/600 °C eau : 250/400 °C | huiles : 270 à 400 °C eau : 250 à 400 °C | eau : 250 °C |
| Stockage thermique | non | béton, céramique, sable | béton, sels fondus | béton |
| Cycle thermodynamique | Stirling (He ou H ₂ , 700°C, 150 bars) | Rankine (vapeur saturée ou sèche 250/565°C) ou Cycle Combiné au Gaz | Rankine (vapeur saturée ou sèche 250/565°C) | Rankine (vapeur saturée 250 °C) |
| Avantages - inconvénients | Unités décentralisées, très forte concentration, et haute technologie : - suivi sur 2 axes - très haute pression - très haute température Fiabilité problématique Coûts élevés | Centrales industrielles à forte concentration, et haute technologie : - suivi sur 2 axes - très haute température Récepteur pointu Système complexe | Centrales industrielles à moyenne concentration, technologie plus simple : - suivi sur un axe - température moyenne Pertes de charge élevées Rendements moyens | Centrales industrielles à moyenne concentration, technologie plus simple : - réflecteurs plans - suivi sur un axe - température moyenne Rendements faibles |
| Rendement max instantané à MT | 35% | 30% | 25% | 20% |
| Rendement annuel moyen actuel | 19-25% | 16-17% | 15-16% | 9% |
| Rendement annuel moyen à MT | 30% | 25% | 20% | 15% |

Les systèmes paraboliques, destinés à la satisfaction de besoins en énergie décentralisés, mettent en œuvre une technologie de production d'électricité qui leur est propre (moteur Sterling) et qu'il faut donc développer spécifiquement.

Les trois types de centrales électriques solaires (tour, cylindro-parabolique, Fresnel) font par contre appel aux technologies en usage dans la génération électrique de puissance en alimentant en vapeur d'eau ou en gaz (air), surchauffé et sous pression, des turbines à vapeur et/ou à gaz conventionnelles, moyennant bien évidemment une optimisation adaptée. Ces centrales se prêtent donc particulièrement bien à une **hybridation avec les énergies fossiles ou la biomasse**, les turbines étant alimentées conjointement ou alternativement par les deux énergies, solaire et fossile³⁵, selon les moments de la journée (jour/nuit), le niveau d'ensoleillement (chute lors des passages nuageux) et la demande du réseau électrique.

³⁵ Gaz naturel en général.

Ces centrales électriques solaires, fournissant une énergie brute sous forme de chaleur HT, se prêtent de même tout particulièrement bien au **stockage thermique**, dont plusieurs solutions sont en cours de développement, ce qui permet aussi bien d'étaler la production d'électricité, et/ou de la décaler dans le temps, et/ou de la concentrer sur l'extrême pointe.

6. Solaire PV et concentré : Les principaux acteurs mondiaux et leurs atouts

Le marché du PV a été lancé par le Japon et l'Allemagne, qui ont tous deux décidés bien avant tout le monde de miser à fond sur le solaire, et ce, dans une double optique d'indépendance énergétique et de développement industriel sur un nouveau marché porteur. Les Etats-Unis, qui disposent de grands espaces désertiques très ensoleillés, et la Chine, qui met le paquet sur toutes les énergies nouvelles, sont maintenant également très agressifs, avec de nombreuses start-up très innovantes. L'industrie photovoltaïque mondiale a réalisé en 2008 un chiffre d'affaires hors installation de 12 milliards € environ et le parc installé fin 2008 est de l'ordre de 15 000 MW.

Le marché du solaire concentré commence lui tout juste à émerger, avec un parc installé se limitant à 650 MW et avec en fait seulement 300 MW installés ces dernières années, mais les perspectives d'un essor rapide s'affirment de jour en jour. L'Espagne, dotée d'une volonté politique sans faille de déploiement à marche forcée, est l'épicentre mondial de ce marché : une quinzaine de projets représentant un total de près de 1 500 MW y sont en cours de réalisation³⁶. L'Allemagne, qui a soutenu massivement les initiatives espagnoles sur le plan scientifique, est aujourd'hui incontestablement le leader technologique et industriel sur le marché mondial.

Côté français, face à ce déploiement stratégique mondial autour du solaire, les initiatives allant dans le sens de la création d'une filière industrielle française n'ont a priori de chances raisonnables d'aboutir qu'avec une convergence forte des efforts de recherche entre les acteurs du monde académique et entre ces derniers et les industriels ou énergéticiens initiant actuellement une stratégie solaire volontariste (EDF, TOTAL, Saint-Gobain, GDF-SUEZ, SolarForce, Photowatt, CNIM/BERTIN, Solems, ...), sans quoi les technologies de rupture et les activités industrielles seront avant tout originaires d'ailleurs...

L'industrie mondiale du photovoltaïque (PV direct)

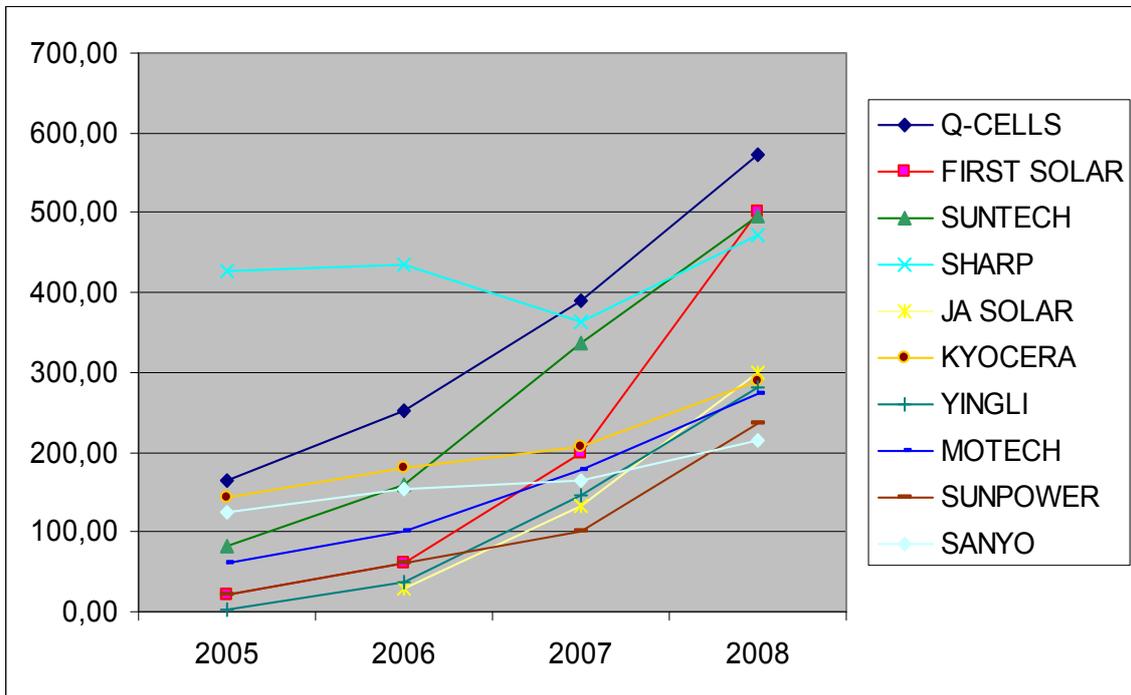
La situation était la suivante en 2007 et 2008 :

| Entreprises Companies | Pays Country | Technologie des cellules Cell technology | Production | | Production capacity | |
|--------------------------|------------------|---------------------------------------------|------------|-------|---------------------|--------|
| | | | 2007 | 2008 | 2008 | 2009 |
| Q-Cells | Germany | Crystalline/Thin film | 389 | 574 | 760 | 800 |
| First Solar | USA | Thin film | 206 | 502,6 | 735 | >1 000 |
| Suntech Power | China | Crystalline/Thin film | 327 | 497,5 | 1 000 | 1 000 |
| Sharp | Japan | Crystalline/Thin film | 363 | 473 | 710 | 710 |
| JA Solar | China | Crystalline | 132,4 | 300 | 500-600 | 600 |
| Kyocera | Japan | Crystalline | 207 | 290 | 300 | 650 |
| Yingli Green Energy | China | Crystalline | 150 | 281,5 | 400 | 600 |
| Motech | Taiwan | Crystalline | 196 | 272 | 580 | 580 |
| SunPower | USA, Philippines | Crystalline | 100 | 236,9 | 414 | 414 |
| Sanyo | Japan | Crystalline/Thin film | 165 | 215 | 340 | 500 |

*Estimation. Les décimales sont séparées par une virgule. Decimals are written with a comma. Source : EurObserver 2009.

³⁶ Les projets sont d'une taille maximale de 50 MW (limite de puissance pour un tarif de rachat supérieur ou égal à 0,27 €/kWh). La limite de puissance en France pour bénéficier d'un tarif de rachat est plus basse : 12 MW (le tarif de rachat est en cours de discussion).

...avec en fait une forte montée en puissance des dix premiers fabricants mondiaux :



Il y a quatre entreprises au coude à coude pour la première place, Q-Cells (Allemagne), First Solar (USA), Suntech Power (Chine) et Sharp (Japon), avec chacune 10% environ du marché mondial. Globalement, on constate une forte prééminence asiatique, avec dorénavant sept représentants dans les dix premières places. Cette situation résulte de la montée en puissance de la Chine, qui assure maintenant 25% du marché mondial, à l'égal du Japon et de l'Europe³⁷, d'un déclin relatif du Japon, qui encore en 2004 livrait la moitié du marché mondial, et de l'agressivité des start-up américaines sur des technologies de rupture (film mince) : First Solar, spécialisé dans les films minces en CdTe, a décuplé de taille entre 2006 et 2008 et Nanosolar, spécialisé lui dans les films minces en CIGS, pourrait suivre le même chemin, bien que, malgré de nombreuses annonces périodiques, il n'y ait pas encore de concrétisation commerciale.

Cette industrie, qui a connu jusqu'à l'été 2008 des conditions apparemment idéales de développement (croissance très soutenue du marché³⁸), a réalisé soudainement toute la fragilité qu'il y avait encore à ne reposer que sur un nombre beaucoup trop restreint de marchés dans le monde, à savoir principalement les deux marchés allemand et espagnol.

En octobre 2008, l'arrêt brutal du marché espagnol (le plafonnement des installations n'ayant pas été levé), conjugué aux effets dépressifs de la crise financière, a gelé la demande, et la totalité du marché mondial s'est retrouvé en situation de surcapacités de production. Le premier semestre 2009 a vu les prix de vente des modules tomber d'environ 20%, tandis que le prix d'achat du silicium de qualité électronique retombait à 35-40 €/kg, un véritable effondrement après les sommets à plusieurs centaines de \$/kg sur le marché spot.

Pour resituer les ordres de grandeur, une baisse de 50€/kg se traduit mécaniquement par une réduction d'au moins 0,5€/W_c, ce qui ne facilite pas l'arrivée des nouveaux entrants. Les leaders du marché semblent avoir pu se renforcer à cette occasion grâce à leur capacité à réduire drastiquement leurs coûts (économies d'échelle). A cet égard, il sera intéressant d'observer en 2010 l'impact des fortes turbulences tarifaires de 2009 sur les livraisons effectives des nouvelles capacités industrielles.

³⁷ L'Allemagne y a une part de 90%.

³⁸ Et même explosive en 2007 (+ 60%) et en 2008 (+ 75%).

Du point de vue du rapport de force entre la solution PV traditionnelle (Silicium cristallin) et les solutions nouvelles mettant en œuvre beaucoup moins de matière (films minces), les films minces sont en train semble-t-il de vraiment décoller, dépassant maintenant nettement 10% du marché (11,6% en 2007 et 13,0% en 2008 contre 5,9% en 2005 et 8,2% en 2006). Les films minces CdTe sont devenus majoritaires en 2008 (54%), devant les films minces silicium (43%), les films minces CIGS (3%). Les films minces organiques ou hybrides (0%), dont les potentialités sont encore très prospectives, devraient semble-t-il commencer à arriver sur le marché prochainement (Konarka/USA, Solarmer/USA, G24i/UK), mais avec des volumes qui seront sans doute au départ assez modestes.

Les films minces devraient encore renforcer leurs positions si les différents gros projets de parcs solaires à l'étude faisant appel aux produits de First Solar (CdTe) voient le jour, notamment trois parcs en Californie (250, 300 et 550 MW respectivement) et une gigantesque installation de 2 000 MW en Chine (Mongolie intérieure).

Bien évidemment, le silicium cristallin a encore devant lui des marges importantes de progrès, tant en coût qu'en rendement. L'objectif de chaque filière est de proposer des systèmes complets (structure, câblage, installation, onduleur) permettant d'arriver la première à la « parité réseau » sans subvention (i.e. sans tarif de rachat), au moins dans son domaine de prédilection, c'est-à-dire celui où elle peut valoriser pleinement ses spécificités.

Les principaux liens d'actionnaires au sein de l'industrie nationale « historique » sont les suivants : CEA (PV Alliance), EDF EN (50% Tenesol, 19% Nexcis, PV Alliance), GDF Suez (47,8% Photovoltech), Photowatt (PV Alliance), Saint-Gobain (100% Avancis), TOTAL (47,8% Photovoltech, 50% Tenesol, 20% Konarka), Schneider Electric (Solaire Direct). Il faut maintenant ajouter à cette liste un certain nombre de nouveaux acteurs qui investissent ou se reconvertissent sur cette technologie : Sillia Energie, MPO, Solarézo, etc..., ou qui cherchent à diversifier leurs produits pour le bâtiment : Soprema, Lafarge, etc...

A noter aussi un certain nombre d'équipementiers ou de fournisseurs de produits spécifiques qui occupent pour certains des positions internationales tout à fait honorables, dont Air Liquide, Vésuvius, ECM, Semco Engineering, et Carbone Lorraine.

L'industrie mondiale du solaire concentré (y c. PV concentré)

Pour le solaire concentré thermodynamique, deux pays sont leaders du domaine en Europe : **l'Allemagne et l'Espagne**. En Allemagne on trouve la plupart des équipementiers : Schott, Flabeg, Siemens ... et des entreprises telles que Solar Millenium qui adossé à de grands groupes (ici MAN) sont capables de prendre en charge la construction complète des centrales. En Espagne, il y a incontestablement un leader parmi les ensembliers/opérateurs: Abengoa Solar. La création par Abengoa de la plateforme Solucar près de Séville, qui sera équipée d'ici deux ans de 300 MW_e constituée de 3 centrales à tour (2x20 MW et 1x10 MW, dont deux sont déjà en fonctionnement) et de 5 centrales cylindro-paraboliques de 50 MW_e illustre parfaitement ses ambitions, qui sont énormes. Abengoa développe déjà une politique d'internationalisation (bureaux aux USA et en Chine).

D'autres acteurs espagnols émergent, comme Iberdrola Renovables, qui est un fournisseur de technologies, et Sener, qui est lui un ingénieur.

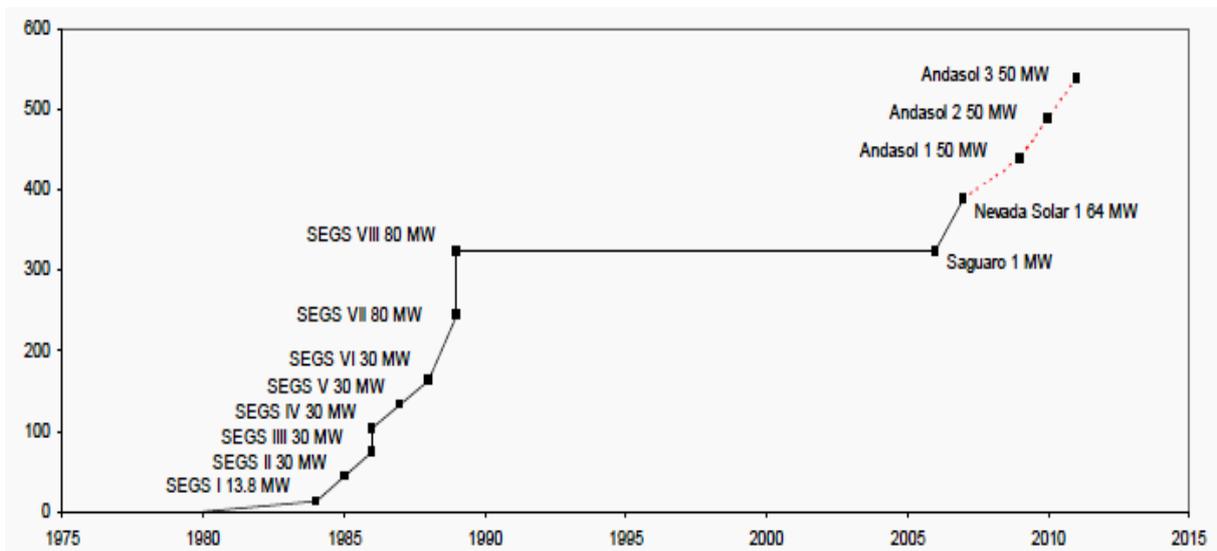
L'Italie (ENEA) est un acteur en émergence avec le développement de nouveaux tubes absorbeurs pour cylindro-paraboliques pouvant opérer à 500°C avec du sel fondu.

Aux USA, quelques entreprises très actives s'imposent : Acciona, e-solar ou Ausra. Ausra est notamment active dans le développement de centrales à concentrateurs Fresnel, avec une centrale de 5 MW en fonctionnement et un projet de 177 MW, les deux en Californie. En ce qui concerne les systèmes paraboliques, dédiés aux petites puissances, deux entreprises américaines, SES et Infinia Corp, développent des modules de 25 kW_e et 3 kW_e respectivement. En Israël, la société Brightsource, héritière de Luz, développe un concept avancé de centrale solaire à tour à vapeur surchauffé.

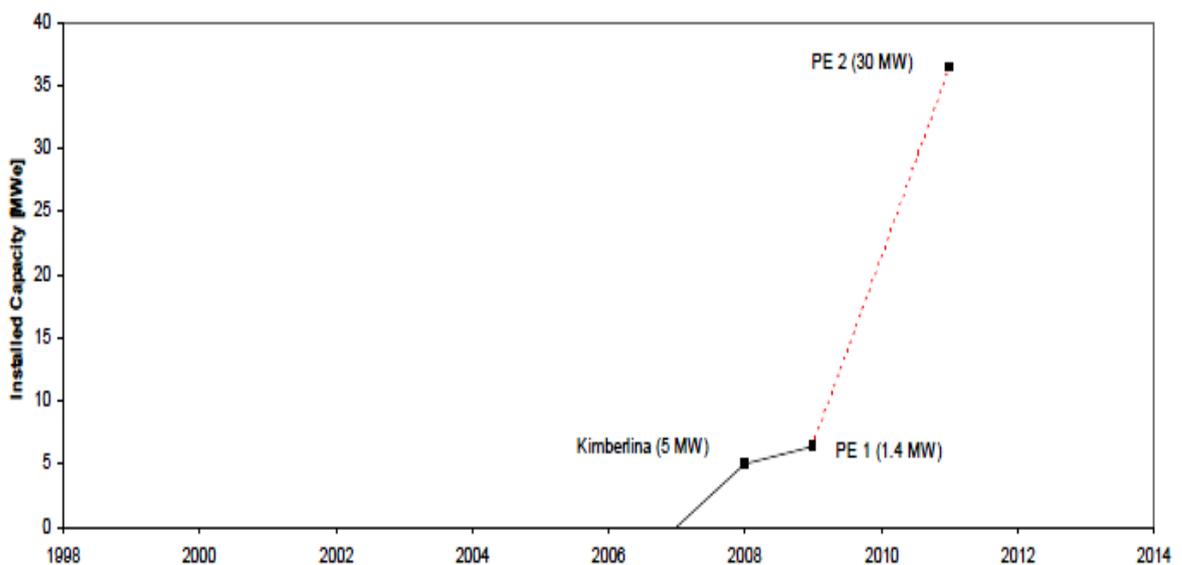
En Afrique du Nord, des projets de centrales hybrides « soleil-gaz naturel », mais à dominante 80% à 95% gaz (20 à 25 MW solaire), sont en cours de réalisation (Algérie, Maroc) ou viennent juste d'être décidés (Egypte) à l'initiative d'acteurs espagnols (Abengoa, Iberdola). Il s'agit de centrales gaz à cycle combiné conventionnels dont la turbine à vapeur reçoit un supplément de vapeur d'eau sous pression d'un petit champ de miroirs cylindro-paraboliques installé à proximité.

On note ces dernières années des innovations importantes dans le domaine des champs d'héliostats, des récepteurs et des concepts globaux. **En France**, certaines grandes entreprises (TOTAL, EDF, Veolia ...) sont partenaires de projets internationaux et la CNIM a la volonté de se positionner comme équipementier. Un projet national cylindro-parabolique de 12 MW, SOLENHA, mené par Euromed, n'a finalement pas vu le jour faute d'une compatibilité suffisante avec les normes en vigueur.

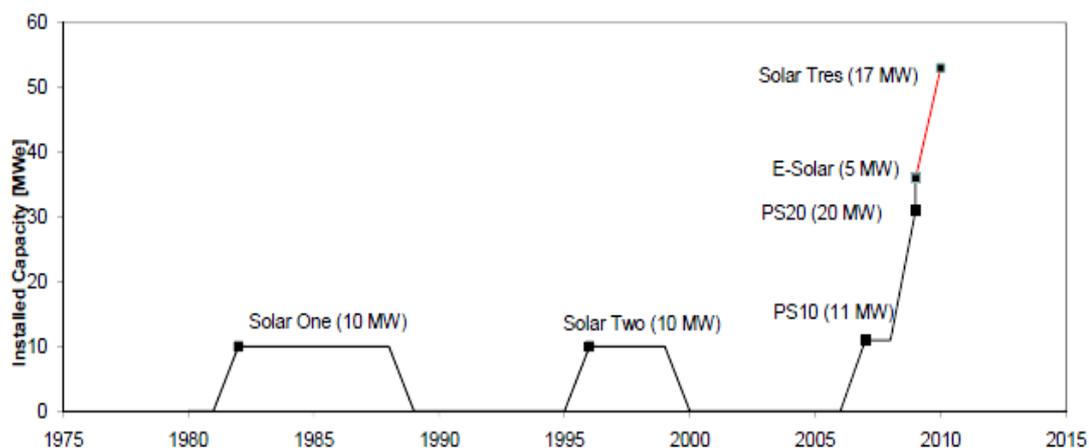
Ci-après une visualisation du déploiement du marché pour les différentes catégories de centrales solaires thermodynamiques :



Centrale cylindro-parabolique : puissance (MW) connectée au réseau



Centrale à concentrateurs Fresnel : puissance (MW) connectée au réseau



Centrale à tour : puissance (MW) connectée au réseau

Le marché du solaire PV concentré (concentration typique de 500 « soleil » sur une cellule photovoltaïque à très haut rendement) commence lui aussi à émerger. Les perspectives actuelles en termes de parcs installés cumulés sont de 50 MW en 2009 et de 100 MW en 2010 (parcs allant de quelques centaines de kW à quelques MW), contre seulement 15 MW en 2008. Les fournisseurs de cellules très haut rendement (AsGa multi-jonctions) sont américains (Spectrolab, Emcore) et allemand (Azur Space). Il en est de même pour les principaux fournisseurs de systèmes complets³⁹ : Solfocus (USA), Amonix (USA), Concentrix (Allemagne), outre les fournisseurs de cellules eux-mêmes, qui tendent à s'intégrer vers l'aval.

³⁹ Il y a d'ores et déjà une vingtaine d'entreprises fournisseurs de systèmes complets.

7. Solaire PV et concentré : Structure et forces/faiblesses de la recherche en France

Les deux centres français « pilote » de recherche sur l'ensemble des thématiques solaires, thermiques et électriques, sont INES (CEA/CNRS/UNIV ; Chambéry) et PROMES (CNRS/UNIV ; Perpignan et Odeillo), avec comme principal point fort : le PV silicium à INES et le solaire concentré à PROMES.

Concernant les thématiques PV, outre INES, deux autres Instituts ont développé des compétences d'ensemble : l'IRDEP (EDF/CNRS/ParisTech ; Chatou) et InESS (CNRS/UNIV ; Strasbourg). Un très grand nombre de laboratoires sont plus ou moins spécialisés sur une ou plusieurs thématiques (Silicium massif, PV couche mince, PV organique et hybride). Certains d'entre-eux, comme le LPICM (CNRS/Ecole Polytechnique) dans les films minces silicium, sont à la pointe dans leur domaine. Le PV organique, mis à part trois laboratoires (CEA, IMS, XLIM), compte surtout un très grand nombre de petites équipes, situation qui nuit à l'efficacité globale de la recherche.

Sur le plan général, les conditions d'ensemble étaient peu porteuses ces dernières années :

- ▀ une communauté scientifique active dans le PV globalement faible numériquement ;
- ▀ un départ tardif sur le développement technologique du fait de moyens engagés faibles en comparaison avec les pays en pointe (Japon, Allemagne, USA).
- ▀ une faiblesse sur l'ensemble du savoir-faire, ce qui se reflète dans la faible présence globale dans la propriété intellectuelle du domaine.
- ▀ une faible coordination des organismes (ANR, CNRS, CEA, IFP, ADEME) entre eux et avec les programmes européens.
- ▀ la communauté scientifique PV est globalement faible numériquement.

Pourtant, d'une part, la collectivité nationale possède un tissu industriel dense et des compétences scientifiques de premier ordre en physique et en chimie, et, d'autre part, il existe tout un système de crédits d'impôt incitatifs pour l'équipement des ménages.

Par ailleurs, un contexte politique plus porteur est en cours de mise en place (Grenelle de l'Environnement, Alliance ANCRE, ...). En particulier, un fond démonstrateur de recherche sur les nouvelles technologies de l'énergie a été créé en juillet 2008. Ce fond a vocation de financer des démonstrateurs de recherche. C'est dans ce cadre que l'ADEME lancera, mi-2010, un appel à manifestation d'intérêt sur le solaire photovoltaïque et thermodynamique. Quarante millions d'euros y seront destinés et la rédaction des feuilles de route définissant le cadre de cet appel à manifestation est en cours.

Cependant, mis à part le projet PEGASE (solaire thermodynamique concentré), et au-delà des mises en commun au travers des plateformes technologiques, la communauté solaire manque peut-être avant tout de **projets structurants** en profondeur comparativement à ce qui se fait dans le monde.

Ainsi, dans le PV organique, à titre d'exemple :

- ▀ aux Etats-Unis (mars 2007), le Department of Energy (DOE) apporte \$1,200,000 à la société Konarka pour la première année d'un programme de recherche sur des cellules organiques à très bas coût, avec une rallonge programmée de \$3 600 000 sur 3 ans si les objectifs sont atteints.
- ▀ en Allemagne (juillet 2007), une initiative regroupant le Ministère de l'Education et de la Recherche (BMBF) avec les industriels BASF, Bosch, Merck and Schott, a été lancée : 360 M€ a été allouée à la recherche sur le PV organique, dont 60 M€ viennent du Ministère (l'objectif est d'atteindre des rendements de 10 %).

En fait, ces initiatives ont le plus souvent directement ou indirectement en toile de fond des start-up prometteuses, en l'occurrence Konarka aux USA et Heliatek en Allemagne. Il y a peut-être là l'une des clés d'une dynamique d'ensemble plus forte. Ces start-up sont le plus souvent des essaimage fondés sur la base d'un portefeuille de brevets étoffé résultant d'une recherche de rupture de longue haleine au sein d'une université (ex : Etats-Unis) ou d'un Institut de recherche (ex : Allemagne).

8. Solaire PV et concentré : Les défis les plus critiques et les pistes de partenariat

Dans une perspective de minimisation des impacts environnementaux et de raréfaction des ressources naturelles, l'arbitrage entre les différentes solutions technologiques sera avec le temps de plus en plus déterminée par les **performances globales anticipées du cycle de vie complet** tant pour l'énergie (rendement net en E de la transformation/conversion) que pour les matières premières (niveau de disponibilité des MP mises en œuvre, y c. le recyclage).

Toutefois, les solutions durables ne sont le plus souvent pas accessibles immédiatement et la dynamique de départ permettant de créer progressivement le marché doit faire appel à des **solutions « start-up »**, non durables en termes d'énergie et/ou de matières premières, mais plus aisées à mettre en œuvre pour nourrir un marché solvable dans une période transitoire, plus ou moins longue selon les domaines d'application.

Tant dans les filières PV que dans les filières thermiques concentrées, les solutions start-up, c'est-à-dire les solutions pionnières destinées à ouvrir les marchés, sont déjà largement défrichées par des entreprises déjà bien installées dans des dynamiques fortes de développement (ex : PV silicium cristallin et silicium amorphe) ou, dans les filières encore émergentes, en bonne position pour acquérir rapidement des positions fortes (ex : solaire thermique concentré, PV concentré, PV films minces autres que le silicium amorphe).

Cette phase initiale du développement technologique est donc sans doute jouée. Cependant, l'enjeu crucial d'une énergie solaire bon marché subvenant largement aux besoins mondiaux d'énergie est encore loin d'être gagné. **La clé** est sans doute largement dans une **recherche de rupture** levant des verrous scientifiques et technologiques.

Les ruptures peuvent aussi bien porter sur la mise en œuvre de matériaux actifs totalement nouveaux que sur des pistes technologiques nouvelles permettant un saut dans les performances E et MP des systèmes installés, comme le silicium cristallin ou les films minces silicium.

Le cahier des charges d'une énergie bon marché et s'inscrivant dans une démarche de développement durable pourrait être d'aller vers de nouveaux concepts présentant les plus faibles « empreintes » E et MP possibles, s'abstenant même si possible de toute utilisation d'éléments rares et énergivores, et :

- ▀ *filières PV non concentrées* : assurant conjointement une haute productivité surfacique et des performances minimales reproductibles (rendement, durée de vie) ;
- ▀ *filières PV concentrées* : assurant de très hauts rendements sous de très haute concentration.
- ▀ *filières thermiques concentrées* : assurant de hauts rendements sous de très haute concentration.

Filières PV non concentré inorganiques

1) Filière silicium cristallin

Le défi est tout autant d'augmenter massivement l'offre de silicium, tributaire jusqu'à présent essentiellement des rebuts de l'industrie électronique, que de réduire fortement les coûts. Les principales pistes actuelles sont les suivantes :

- ▀ l'obtention d'un silicium de qualité solaire à partir du silicium métallurgique, ce qui requiert la maîtrise de sa composition, de ses défauts et du transport des charges en son volume.
- ▀ la fabrication de silicium ruban ultra-mince (<100µm), ce qui devrait permettre un gain de matière substantiel et une réduction du temps de retour sur énergie.
- ▀ La cristallisation directe par moulage de plaquettes. Cette option consiste à mouler en parallèle des plaquettes de silicium, ce qui permet potentiellement un meilleur contrôle de la structure cristalline tout en préservant une productivité élevée.
- ▀ le développement de cellules à hétérojonctions impliquant des couches de silicium amorphe (a-Si) ou de carbure de silicium (a-SiC) sur des plaquettes de silicium mono ou multi-cristallin.

2) Filières films minces silicium

Les enjeux dans ce domaine sont de développer des procédés à haut débit sur des grandes surfaces, avec des rendements de 12-15% sur module, ce qui suppose une architecture multi-jonctions, tout en assurant une stabilité opérationnelle sur 20 à 30 ans, i.e. une baisse de rendement avec le temps limitée à 10% maximum. En vue d'une industrialisation, il faut assurer l'uniformité des propriétés des films sur des grandes surfaces, et comprendre la différence en rendement entre les cellules de laboratoire et les modules de grande surface. Il est également important de développer de nouveaux substrats adaptés aux procédés de dépôt ainsi que des matériaux d'électrode de grande qualité et de faible coût.

Différentes voies d'investigations devront être menées pour réaliser des cellules/modules avec du silicium en couches minces. La structure cristallographique, et donc la structure de la cellule et du module, vont être conditionnée par la température que peut supporter le substrat sur lequel le matériau silicium va être formé. Ainsi, à faibles températures (< 200°C), les substrats utilisés sont des verres ou des feuilles métalliques (Inox) ou éventuellement des polymères. Ces substrats sont compatibles avec des procédés de dépôt CVD assistés par plasma radio-fréquence (RF) haute-fréquence (HF) ou micro-onde (MW).

A température moyenne (< 600°C), les substrats à utiliser sont des borosilicates, des céramiques, des verres hautes températures ou des feuilles métalliques avec barrière de diffusion. Ces substrats sont compatibles avec un dépôt CVD à pression réduite (RP-CVD), mais qui résulte en un film Si avec des grains de moins de 1µm.

L'approche semble-t-il la plus prometteuse dans ce créneau de température est la cristallisation en phase solide du silicium amorphe assistée par métaux. Comme la croissance des grains est latérale et parallèle au substrat, le film poly-Si obtenu peut atteindre des grains dix fois plus large que son épaisseur. La taille des grains peut varier de 10 à 100µm. Les films formés étant minces, leur épaissement peut se réaliser par des procédés chimiques (CVD) ou ionique (IAD) pour aboutir à des films de 2-3µm. Cela représente un gain en matériau important, pourvu que le confinement optique à l'avant et à l'arrière du film soit assuré.

3) Filières films minces chalcogénure (CIS et CIGS)

La filière chalcopyrite présente les perspectives de rendement les plus importantes parmi les films minces, mais recèle également un risque spécifique : les matériaux chalcopyrites, qui sont complexes, sont développés uniquement pour les applications photovoltaïques.

Une recherche dynamique dans le domaine ne peut apparaître et perdurer sans un développement industriel associé. Il faut donc qu'elle ait un impact réel sur le développement de la filière. Bien sur, des recherches de type plus fondamental, sur la connaissance du matériau, restent nécessaires pour donner des perspectives à cette filière sur le long terme et doivent être menées en parallèle avec les recherches appliquées.

Compte tenu des perspectives actuelles, les directions prioritaires recommandées pour la filière chalcopyrite sont tout d'abord celles susceptibles de donner lieu à un renforcement du développement industriel en France (donc potentiellement brevetable):

- ▀ l'amélioration des procédés d'élaboration de cellule, en particulier vers le bas coût, les procédés en continu, et sur substrats flexibles, à condition de permettre l'émergence de procédés suffisamment performants et innovants pour faire l'objet d'un développement en France.
- ▀ le développement de procédés clés (traitements de substrats, d'interface, de dopage, de recyclage) susceptibles de contribuer au développement de la filière.
- ▀ le développement de technique de caractérisation pour le contrôle en ligne de la fabrication des cellules, y compris la qualification des réactifs (solutions, précurseurs MOCVD, cibles sputtering ou sources d'évaporation).

La recherche de matériaux chalcogénures performants sans Indium est aussi de nature à renforcer les perspectives de la filière sur le long terme même si un rapport récent du Bureau de Mines US tend à

relativiser les craintes initiales⁴⁰. Elle aurait avantage à s'appuyer sur le fort réseau français de chimie du solide.

La recherche en direction de structures tandem purement chalcopyrites semble prématurée tant que la possibilité de faire des cellules efficaces (>15%) avec des alliages grands gap (>1.6 eV) n'aura pas été démontrée. Cela passera sans doute par une meilleure maîtrise du dopage des chalcopyrites et de la préparation de l'hétérojonction. Ce sont donc deux thématiques fondamentales importantes pour l'avenir de la filière.

4) Filières films minces CdTe

Bien que la recherche française -et notamment le CNRS- ait eu une position de leader dans ce domaine dans les années 80, les efforts de développement se sont éteints tant en Europe qu'au Japon en raison de verrous sur la stabilité des dispositifs et de la présence d'un élément non substituable toxique pour l'environnement (cadmium).

Il semble cependant que ces deux verrous aient été surmontés comme le montre le succès foudroyant de First Solar. Il ne paraît pas réaliste d'imaginer aujourd'hui le re-démarrage d'une filière CdTe "française". Par contre, compte tenu de l'installation probable d'une usine « First Solar » en France, il pourrait s'avérer utile de mener des recherches accompagnant le développement de cette filière, en venant l'améliorer et créer de la propriété industrielle nouvelle.

Filières PV non concentré organiques/hybrides

Concernant les cellules organiques ou hybrides, la difficulté de base est de garantir des stabilités de cellules supérieures à 20 ans. Cette difficulté n'est toutefois pas tant liée à des interdictions physiques de principe qu'à la difficulté de concilier harmonieusement tous les paramètres qui dans une ingénierie multi-échelle permettront de réaliser les objectifs.

Au delà de la stabilité, un des défis que doivent relever toutes les technologies PV est l'approvisionnement en matériaux actifs : pour 1 GW crête, il faudra environ 1000 T pour la filière silicium et environ 1 T pour la filière polymère (les acteurs qui vont produire une telle quantité de polymères semiconducteurs sont encore difficiles à identifier mais on voit déjà venir Solvay (Belgique)).

Filières PV concentré

La filière III-V (cellules à base de AsGa), en raison des rendements toujours plus élevés obtenus en cellules multi-jonctions et de son aptitude à recevoir des flux solaires très concentrés, tend à supplanter définitivement la filière Si cristallin, qui sur ces deux plans souffre comparativement de handicaps intrinsèques rédhibitoires.

Les prix des dispositifs commerciaux de dernière génération à base de AsGa, qui combinent un rendement « système » en tri-jonction de 20-22% et un niveau de concentration de 500 soleils, sont de l'ordre de 6 \$/W_c.

L'objectif de prix en terme de coût « système » est de moins de 1 \$/W_c à l'horizon 2025. Pour cela, le défi à relever est la mise au point de systèmes capables d'exploiter un flux solaire de l'ordre de 2000 soleils et possédant des rendements de conversion solaire-électricité de 28-30% minimum. L'une des clefs de ce développement est la mise au point de cellules tandem comportant de quatre à six jonctions minimum et dotées d'un rendement de conversion de 50% supérieur, soit de l'ordre de 30%.

⁴⁰ C'est un sous produit des mines de Zn, Fe, Pb ou Cu, qui serait bien plus abondant que l'argent ou le mercure. cf <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1025/2006-1025.pdf>, et <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1300/2004-1300.pdf>

Filières PV toutes confondues: nouveaux concepts pour le LT

Les défis sont aussi générateurs de découvertes et concernant les très hauts rendements, les nanotechnologies ainsi que les progrès de la photonique permettent d'entrevoir des fonctionnements de type cellules multi-jonctions et/ou cellules à conversion de photons dont certaines seront compatibles avec des technologies bas coût en grandes surfaces. Ces cellules permettent d'envisager des efficacités limites atteignant 85%. Ces approches, encore très prospectives, sont décrites en annexe.

Filières thermiques concentrées

En suivant la chaîne de conversion, du système d'interception du rayonnement solaire au stockage thermique, les principaux défis de la filière solaire concentré sont :

- ▀ Systèmes de concentration : nouveaux miroirs (hors verre), optimisation des systèmes (support/réflecteur/moteurs de suivi du soleil/contrôle), conception et réalisation de systèmes industriels permettant des hautes concentrations (cycles à haute température, thermochimie solaire), mécanisme de vieillissement des composants.
- ▀ Récepteurs solaires : maîtrise des propriétés thermo-optiques des surfaces absorbantes (revêtement, structuration), intensification des transferts, thermomécanique des matériaux à haute température, design global.
- ▀ Fluides de transfert (mise en oeuvre de fluides sûrs et sans impact environnemental) : maîtrise des transferts pariétaux avec la vapeur (d'eau) et l'air, nouveaux fluides (CO₂, mélanges diphasiques ...).
- ▀ Stockage : matériaux de stockage adaptés aux nouveaux fluides de transfert (matériaux à changement de phase et matériaux à haute température), maîtrise puissances échangées dans les systèmes (transferts interfaciaux et en masse), stabilité des composants à long terme, stockage thermochimique, validation des concepts à une échelle significative.

Par ailleurs, une mention spéciale doit être faite concernant les recherches amont sur les « combustibles de synthèse solaires » (solar fuels). Les développements ne sont pas encore assez avancés pour envisager des applications industrielles à court terme, mais les enjeux sont importants car ils sont relatifs aux applications « transport ». Les recherches concernent la production d'hydrogène et la valorisation de CO₂ (réduction en CO) qui ouvrent la voie vers les combustibles liquides de synthèse. Aux sujets précédents, il faut donc ajouter l'étude des systèmes réactifs (couples rédox), la conception et l'extrapolation des réacteurs solaires à haute température (environ 1500°C).

ANNEXE

PV : pistes de rupture en vue de très hauts rendements

Jean François Guillemoles

IRDEP, UMR CNRS-EDF –ENSCP, EDF R&D, 6 quai Watier, 78401 Chatou

email: jf-guillemoles@enscp.fr

Abstract: *In principle, photovoltaic conversion of solar energy could be much more efficient than it is today using p/n junctions. The reasons for this are presented and discussed. Ways to get closer to the thermodynamic limit of photovoltaic conversion (87%) are outlined, starting with multijunction devices already being developed for space application. Other approaches, more prospective but also potentially enabling a wider dissemination of the technology are then presented: up and down conversion, impact ionisation, intermediate level semiconductors and hot carrier solar cells.*

Limitations et perspectives de la conversion Photovoltaïque

Comme tout système de conversion d'énergie, les générateurs photovoltaïques voient leurs performances limitées par les lois de la thermodynamique. Dans une première approche heuristique, on peut considérer le soleil comme une source chaude à $T_c=6000$ K (sa température de surface), la source froide étant aux environs de $T_f=300$ K⁴¹. Le rendement de Carnot associé à la conversion de l'énergie solaire peut donc approcher en principe $1-T_f/T_c= 95\%$! Les dispositifs photovoltaïques actuels, des photodiodes basées sur des dispositifs à semiconducteurs (inorganiques ou organiques), sont encore loin de cette limite avec des rendements de l'ordre de 20% : la difficulté est de vouloir convertir de façon optimale un ensemble de photons dont l'énergie va de l'IR au proche UV avec un seul matériau actif dont les propriétés optiques, optimales pour une énergie de photon donnée (l'absorption n'étant importante qu'au delà d'un seuil, E_g , dépendant du matériau choisi), ne permettent donc pas une conversion optimale de l'ensemble du spectre solaire.

Pour comprendre pourquoi dans le détail, il faut revenir aux principes de la conversion photovoltaïque, telle que l'ensemble des dispositifs actuellement réalisés la mettent en œuvre. Celle ci se fait en 3 étapes: (i) absorption de photons d'énergie $h\nu>E_g$ qui crée des populations d'électrons et de trous hors équilibre, (ii) chaque type de porteurs atteint très vite un quasi équilibre défini par un quasi-niveau de Fermi (i.e. un potentiel électrochimique) E_{fn} pour les électrons, et E_{fp} pour les trous, dont la différence, $E_{fn}-E_{fp}=qV$, est donc l'énergie libre récupérable par photon absorbé (V est la phototension, i.e. l'effet photovoltaïque), (iii) les porteurs éventuellement collectés aux contacts avant d'avoir pu se recombiner participent au photocourant (voir figure 1). Au final, le dispositif photovoltaïque fonctionne d'une manière assez semblable à celle d'une batterie électrochimique un peu particulière: son anode et sa cathode sont constituées par des niveaux d'énergie différents du même matériau!

Or dans ce type de dispositif on doit avoir $h\nu>E_g$ du fait des propriétés d'absorption, mais aussi $E_g> E_{fn}-E_{fp}$ ⁴². La fraction d'énergie de chaque photon qui peut être efficacement convertie, égale à $qV/h\nu$, est de ce fait relativement réduite car on n'absorbe pas une partie du spectre et car l'énergie libre obtenue de chaque photon est indépendante de l'énergie du photon absorbé (figure 2), le reste est cédé au réseau atomique sous forme de chaleur lors de la thermalisation des porteurs en moins de quelques picosecondes. Elle est limitée à 30% pour un gap E_g optimalement adapté au spectre solaire et dans des conditions standard d'insolation (i.e. AM1).

Puisque les quasi niveaux de Fermi dépendent de la concentration de porteurs⁴³, et que cette dernière dépend de l'intensité du rayonnement absorbé, il s'ensuit que l'énergie libre récupérable par photon incident

⁴¹ pour un rayonnement arbitraire, on peut définir une température correspondant à chaque longueur d'onde λ , comme la température de corps noir donnant la même intensité à λ et généraliser le raisonnement.

⁴² lorsque $E_{fn}-E_{fp}$ devient proche de E_g , on atteint l'inversion de population entre électrons et trous, et l'émission stimulée de radiation vient s'opposer à ce que qV augmente encore.

⁴³ en général $E_f=E_f^0+ kT.\log[n]$, où n est la concentration d'électrons du groupe de niveaux d'énergie considéré et E_f^0 l'énergie libre de l'état standard. C'est une expression similaire à celle du potentiel chimique d'un gaz parfait

dépend (augmente, en fait) avec l'intensité du rayonnement incident: il est donc avantageux de ce point de vue de concentrer le flux solaire avant de le convertir.

Le gain potentiel de rendement de conversion est environ de 10% absolus supplémentaires pour chaque facteur 1000 sur la concentration. En pratique, la concentration utilisable est limitée par la résistance série du dispositif (sous une concentration x1000 du flux solaire, on peut atteindre des courants de 40 A/cm²).

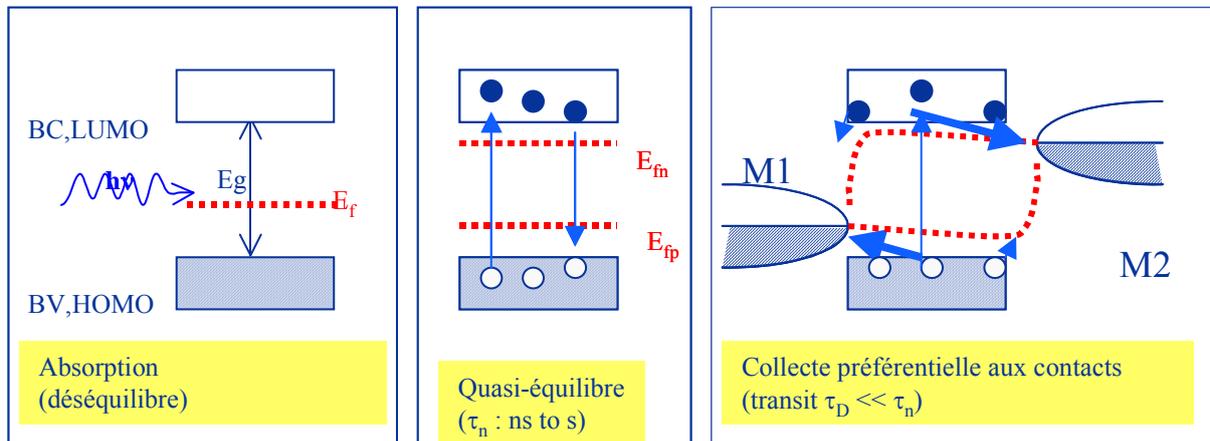


Figure 1: Principe de la conversion photovoltaïque, décomposé en trois étapes principales (i) absorption d'un photon et promotion d'un électron sur un niveau vide supérieur, (ii) établissement de deux populations d'électrons en quasi équilibre interne (via des processus rapides de relaxation, à l'échelle de la ps) mais hors équilibre l'une par rapport à l'autre (les processus interbande de retour à l'équilibre, de temps caractéristique τ_n , sont de l'ordre de la ns), (iii) collecte préférentielle d'un type de porteur de charge à chaque contact (M1 et M2 sont les deux contact, ici de type métallique, servant à la collecte, resp. des trous et des électrons) après un temps de transit τ_D . La nature différente des deux contacts est à l'origine de la rupture de symétrie qui permet l'apparition d'une phototension.

Sur le plan des principes, la concentration maximale du flux solaire est limitée à 42600 fois. Cette limite vient de la thermodynamique (pas de l'optique) : l'image d'un objet ne peut être plus chaud que l'objet lui-même⁴⁴.

On peut calculer la valeur maximale d'énergie libre que l'on peut obtenir pour chaque photon absorbé (figure 2), indépendamment du système de conversion. Cette énergie libre dépend en revanche de l'énergie du photon et de l'intensité du flux incident.

A partir de ces courbes, on peut calculer que le rendement de conversion photovoltaïque maximal que l'on peut obtenir du spectre solaire est de 67% dans les conditions standards et de 87% au maximum de la concentration du flux solaire réalisable.

Au vu des limites exposées ci dessus, il est possible d'imaginer des dispositifs de conversion plus performants que ceux réalisés actuellement, et qui sont présentés dans les autres articles de la série. Si aucune solution satisfaisante n'a pu encore être mise en œuvre, c'est que les matériaux et les technologies n'étaient pas prêts à répondre aux spécifications sévères qui peuvent permettre la mise en œuvre d'autres concepts de conversion.

⁴⁴ sinon on pourrait transporter réversiblement de la chaleur d'un corps froid vers un corps chaud, et nous aurions déjà parmi nous des machines à mouvement perpétuel.

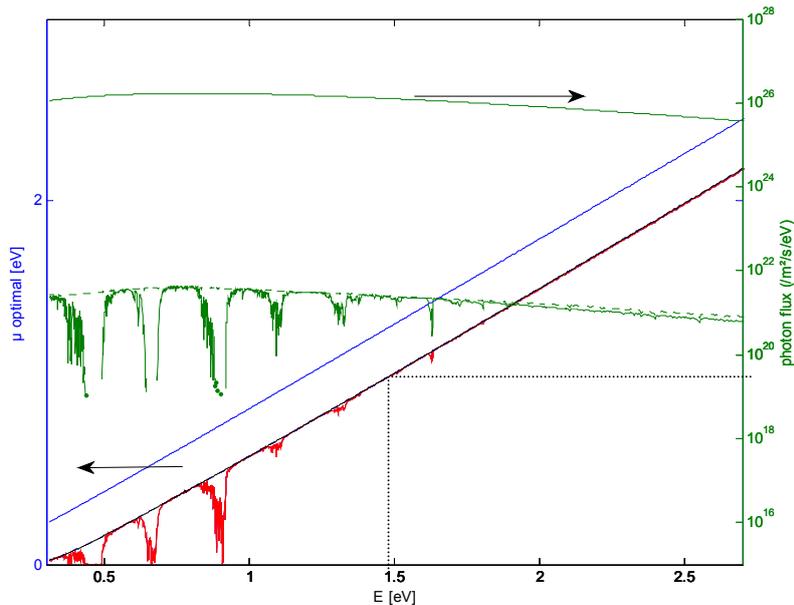


Figure 2: Axe gauche, énergie libre optimale récupérable par photon absorbé (au maximum de rendement de conversion) en fonction de l'énergie du photon (abscisse) et du nombre de photons absorbés (la courbe bleue correspond à un spectre de corps noir à 6000K, la courbe rouge correspondant à l'intensité solaire sur terre et la courbe noire à celle du flux solaire avant son entrée dans l'atmosphère). Axe de droite, le flux de photons sur une échelle log est donné pour les mêmes spectres. La pondération de chaque courbe de μ optimal par le flux lumineux correspondant donne le rendement de conversion maximal qui peut être obtenu : 67% pour la courbe rouge et 87% pour la courbe bleue. La courbe en pointillé noir donne l'énergie libre récupérée par photon dans une cellule solaire de seuil $E_g=1.5\text{eV}$ en fonction de l'énergie absorbée.

Les filières à très hauts rendements

On peut regrouper les stratégies d'augmentation des rendements en trois directions principales, toutes ayant des rendements de conversion ultimes voisins de 85%:

1. Dispositifs « photoniques »: si toute l'énergie solaire était concentrée dans une bande spectrale étroite, les dispositifs actuels seraient déjà capable d'en convertir plus de 50%. On peut donc essayer d'adapter le spectre incident à une ou plusieurs photodiodes. Les exigences nouvelles portent donc sur les propriétés optiques des matériaux.
2. Les matériaux dont la structure électronique permet des transferts d'énergie plus efficaces entre les photons incidents et les électrons du matériau absorbeur. On peut ainsi penser à des matériaux contenant des niveaux électroniques servant d'échelle à électrons (matériaux à niveaux intermédiaires) ou à des matériaux permettant la génération de plusieurs paires électrons-trous dès que le photon incident possède une énergie suffisante (systèmes à ionisation par impact efficace et à seuil bas). Les exigences portent cette fois sur la structure électronique des matériaux.
3. Les machines thermiques dans lesquelles l'absorption de lumière conduit bien à la production de chaleur (énergie cinétique électronique), mais cette chaleur est convertie en puissance électrique. Dans ce dernier cas, il va falloir s'intéresser de près aux propriétés thermiques et phononiques des solides envisagés.

I. Les dispositifs photoniques

La difficulté vient de la mise en œuvre d'un travail en amont sur les photons qui sont soit triés spectralement pour être envoyés sur des jonctions adaptées à la partie du spectre correspondante (multi-jonctions, dont les meilleurs dispositifs dépassent 40% en laboratoire, voir encadré), soit décalés en énergie par transfert d'une partie du spectre à une autre (tout en conservant l'énergie lumineuse totale) pour conduire à une répartition plus « ramassée » avant d'être récupérés par une diode adaptée à ce nouveau spectre.

a) Les multijonctions

Les photons dont la conversion énergétique est la plus efficace dans un dispositif classique sont ceux dont l'énergie est légèrement au dessus du seuil d'absorption (gap). Dans ce cas des rendements de l'ordre de 60% sont atteints expérimentalement, ils sont d'ailleurs assez proches de ce que l'on peut attendre compte tenu de la figure 2. L'utilisation de plusieurs cellules de gap différent chacune optimisée pour une part différente du spectre solaire permet donc en principe d'augmenter le rendement. Pour un nombre donné de cellules et un spectre d'insolation fixé il existe un choix optimal des gaps donnant le rendement le plus élevé. Par exemple, pour 3 cellules sous concentration maximale, le rendement théorique maximum est de 63% (49% sans concentration).

Ces dispositifs, parfois dits "tandems", fonctionnent déjà, et ont démontré des rendements de 43% (sous concentration). Ils sont extrêmement sophistiqués dans leur réalisation et dans leur utilisation mais c'est le premier type de dispositifs aux potentiels de rendement élevé effectivement réalisés. C'est toujours aujourd'hui la seule manière démontrée d'obtenir des rendements de conversion de l'énergie solaire au-dessus de 30%.

Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec des structures sophistiquées basées sur des empilements de composés III-V épitaxiés (voir encadré). Des dispositifs avec deux et trois jonctions ont été démontrés à l'échelle industrielle pour des panneaux de Silicium amorphe en couche mince de grande surface.

En fait, le rendement limite d'un tandem idéal varie en fonction du nombre de jonctions comme

$$\eta(N) = \frac{\eta^\infty}{1 + a/N}$$

avec η le rendement, η^∞ le rendement limite (qui varie de 68% sous AM1.5 à 87% à concentration solaire maximale) et a une constante proche de 1 qui ne dépend que du spectre et de l'intensité de l'insolation. On en déduit le gain incrémental de puissance acquis par l'ajout d'une cellule dans le tandem (il varie comme $1/N^2$). Si l'on prend en compte les imperfections du système, même en restant optimiste, le gain espéré de l'ajout d'une cellule supplémentaire est voisin de zéro dès la 4^{ème} cellule.

b) Les "transformateurs" optiques

Une voie alternative pourrait consister en l'inter-conversion de photons en amont du dispositif de manière à obtenir un spectre incident énergétiquement plus étroit.

Considérons d'abord l'approche "addition de photons". Les photons dont l'énergie est trop faible pour être utilisés directement par une cellule PV classique pourraient être en principe convertis par un phénomène d'optique non linéaire (analogue par exemple à ceux utilisés pour les conversions de fréquences des lasers) en un nombre plus faible de photons d'énergie plus grande. L'ensemble des photons de haute énergie est alors converti par une photodiode classique efficace dans ce domaine spectral.

Jusqu'ici quelques tentatives ont été faites, prouvant la faisabilité du concept mais avec un succès limité en termes de gains d'efficacité absolue : environ 3% des photons dans l'infra-rouge dans la bande étroite d'absorption des terres rares utilisées, sous une illumination équivalente à 250 soleils, ont été effectivement convertis en photons de plus haute énergie.

Les principales recherches sur le sujet se font en utilisant des vitrocéramiques mettant en œuvre des processus de transfert d'énergies entre terres rares de type APTE (addition de photons par transfert d'énergie [ref Auzel-gibert]). Dans ces matériaux, un rayonnement IR est absorbé par plusieurs ions d'une terre rare qui transfèrent ensuite de manière cohérente (par interaction dipolaire) leur énergie à un autre lanthanide capable d'émettre efficacement à la fréquence double.

Le principe de la "division de photons" consiste, à l'inverse, à absorber des photons de haute énergie dans un convertisseur luminescent pour émettre des photons de plus basse énergie mais en plus grand nombre vers une cellule solaire dont le seuil d'absorption est adapté.

Le convertisseur fluorescent peut être placé en face avant, et avec un bon confinement optique (par exemple du à un indice optique élevé) l'essentiel de la lumière émise est absorbée par la cellule. Le gap idéal pour la meilleure performance possible est proche de celui du Si.

Quelques matériaux fluorescents avec rendement quantique⁴⁵ >1 ont été découverts dans les années récentes, par exemple YF3 : Pr (QE=1.4), LiGdF4 : Eu (QE=2: le rendement quantique (QE) mesuré correspond à un rendement quantique interne de transfert de charge mais pas à un rendement réel de conversion). Cependant, bien que des rendements quantiques élevés (> 2) aient été atteints, il faut encore améliorer le rendement énergétique du convertisseur optique, de 2/3 environ actuellement.

II. Les matériaux à mécanismes d'absorption optimisés

a) Les dispositifs à niveaux intermédiaires

Outre les transitions de la bande de valence à la bande de conduction qui ont lieu dans les semiconducteurs sous l'effet du rayonnement, certains matériaux peuvent absorber des photons de plus basse énergie via des niveaux intermédiaires situés dans la bande interdite qui jouent le rôle d'une « échelle à électrons » [Luque].

L'un des grands avantages de l'utilisation de ces matériaux est la réalisation d'un dispositif analogue à une multijonction pour ce qui est des rendements mais avec la complexité de l'élaboration d'une simple jonction.

Une bonne absorption des niveaux intermédiaires suppose qu'ils soient à moitié occupés (c'est malheureusement aussi la condition pour la vitesse de recombinaison la plus élevée). Il faut donc chercher des systèmes dans lesquels ces niveaux aient un caractère « métallique » sans pour autant trop accroître la vitesse de recombinaison non radiative⁴⁶.

Il existe de nombreuses manières d'introduire des niveaux intermédiaires, comme par exemple par l'introduction de défauts étendus ou d'impuretés. Les recherches vont actuellement dans deux directions :

- ▀ formation de minibandes dans un super-réseau de puits quantiques,
- ▀ Recherche de matériaux à bande étroite métallique en se fondant sur des calculs ab initio.

D'autres systèmes à bandes intermédiaires, apparus plus récemment, pourraient être intéressants. Il s'agit de composés semiconducteurs ferromagnétiques, du type de GaAs:Mn, qui pourraient présenter des durées de vies des états intermédiaires intéressantes à cause des règles de sélection sur le spin pouvant ralentir certains processus de recombinaison [ref Raulot].

⁴⁵ le rendement quantique est le ratio du nombre de particules obtenues par photon incident, ici le nombre de photons émis par photon incident à une longueur d'onde donnée.

⁴⁶ bien que ce puisse être non intuitif, une vitesse de recombinaison radiative élevée est en général un facteur favorable.

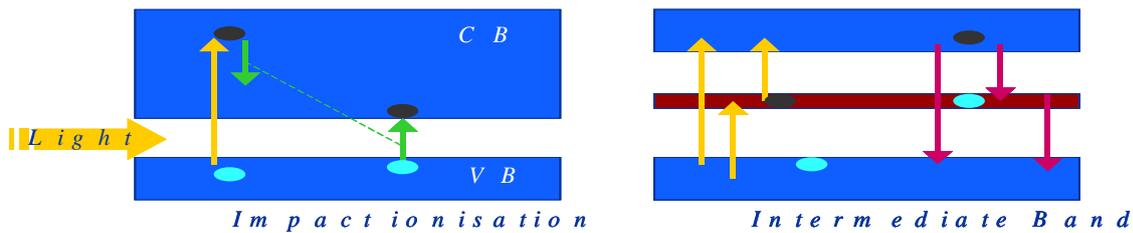


Figure 3 : Diagrammes de bande représentant les phénomènes de génération de porteurs optimisés par rapport au cas standard. A gauche, le phénomène d'ionisation par impact permet de transférer l'énergie excédentaire d'un porteur à un électron qui devient capable de passer dans la bande de conduction. A droite, un matériau à niveau intermédiaire dans lequel l'absorption par l'état excité permet une meilleure utilisation du spectre solaire. Les processus de génération sont en jaune et de recombinaison en mauve.

b) Les matériaux "scintillateurs"

L'absorption de photons dont l'énergie est plus de 2 fois celle du gap permet d'envisager d'autres mécanismes que la création de phonons pour la thermalisation des paires électron-trou : l'excédent d'énergie peut être transmis à une seconde paire électron-trou, un phénomène nommé ionisation par impact.

Les rendements limites de dispositifs à ionisation par impact peuvent être intéressants à condition que le processus soit efficace au voisinage du seuil minimal ($\sim 2 E_g$).

Des travaux au Max Planck de Stuttgart, ont prédit que les alliages Si-Ge pourraient exhiber un effet mesurable. Il s'est avéré être $< 1\%$ pour le rendement de cellules de ce matériau, par contre des rendements quantiques internes⁴⁷ (IQE) entre 1.2 et 2 ont bien été mesurés pour les alliages SiGe, mais ces valeurs ne sont observées que pour des énergies de photons $> 3 E_g$ tandis que des IQE de 2 (100% d'ionisation par impact) ne sont observées que pour $h\nu \sim 7 E_g$ [ref Queisser].

Plus récemment, l'observation d'ionisation par impact dans des nanocristaux de PbSe avec un rendement élevé est venue rouvrir des perspectives dans le domaine.

III. Les "machines thermiques"

Cellules à porteurs chauds

Les porteurs générés dans l'absorbeur ne se thermalisent pas instantanément avec le réseau à la température T_a , mais forment de manière transitoire un gaz d'électrons et de trous « chauds⁴⁸ » : leur distribution correspond à une température $T_h > T_a$.

Si ces porteurs peuvent être collectés rapidement via un niveau étroit en énergie (figure 4), le flux de chaleur avec les contacts sont minimaux et la transformation de l'énergie cinétique du gaz chaud en énergie potentielle électrique est optimale. Le système fonctionne en fait comme un élément thermoélectrique idéal, et c'est l'un des concepts les plus élégants proposés actuellement.

⁴⁷ c'est à dire le nombre de paires éle(voir aussi note 5)

⁴⁸ l'émission de phonons est typiquement de 0.1 ps dans les semiconducteurs usuels

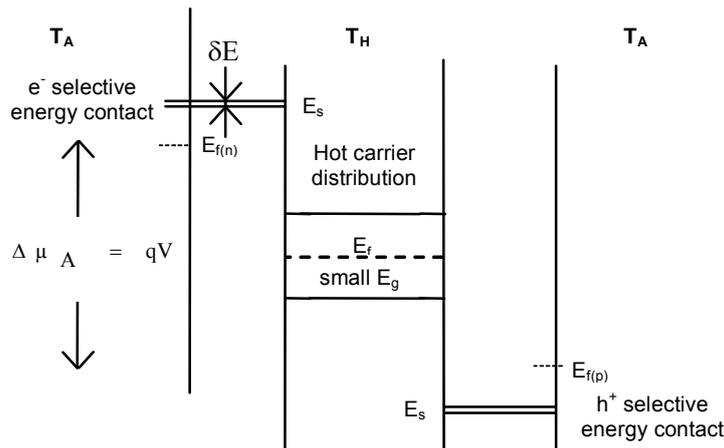


Figure 4 : Diagramme de bandes d'énergie d'une cellule à porteurs chauds. Les photons solaires sont absorbés dans la partie centrale ou se forme un gaz d'électrons chauds (à une température différente de celle du réseau). Leur excédent d'énergie cinétique leur permet d'être récupéré à une énergie supérieure à celle du bord de bande de conduction (pour les électrons) ou de valence (pour les trous). La sélectivité en énergie du contact est la condition pour que la distribution de porteurs chauds ne chauffe pas les contacts, qui doivent rester à la température la plus basse possible.

Les calculs de la limite de rendement donnent des valeurs très proches de celles obtenues avec un dispositif multi-jonction contenant une infinité de cellules chacune adaptée à une fraction du spectre, et ce quelle que soit la concentration et pour un dispositif de conception beaucoup plus simple: il s'agit donc en quelque sorte du dispositif ultime de conversion de l'énergie solaire.

Aucune cellule à porteur chaud n'a encore été réalisée, cependant des mesures de vitesse de thermalisation de porteurs chauds ont été faites dans les semiconducteurs usuels et les métaux.

Les mesures dans les semiconducteurs usuels montrent que les porteurs chauds se thermalisent en quelques picosecondes. Deux faits importants ont été découverts dans les années 90 : le temps de thermalisation, qui doit correspondre au temps caractéristique d'émission de phonons est fortement influencé à la fois par le niveau d'injection (i.e. l'intensité de l'excitation lumineuse) et par des effets de confinement (ref rosenwacks). Il apparaît donc que les vitesses de thermalisation peuvent saturer dans des nanostructures à un niveau suffisant d'illumination. Si l'on prend en compte la thermalisation des porteurs dans les modèles de cellule à porteur chauds, on obtient des rendements pratiquement atteignables qui pourraient dépasser 50% sous concentration dans des matériaux technologiquement accessibles.

La valeur de 50% de rendement correspond à une faisabilité à la limite des possibilités actuelles. Enfin, le rendement de conversion est très sensible à la largeur énergétique des contacts au delà de quelques meV, car ils introduisent alors une perte thermique par transfert de chaleur. Plus que la vitesse de thermalisation, la réalisation de contacts efficaces risque d'être le point délicat dans la fabrication de ces dispositifs.

Conclusions

La découverte de systèmes radicalement différents des diodes semiconductrices pour la conversion à haute performance de l'énergie solaire est-elle une utopie ? Il existe en tout cas un grand nombre de possibilités de principe pour y parvenir.

A court terme, les dispositifs multijonction devraient faire des progrès significatifs et même peut-être avoir dès ces prochaines années un impact notable sur la production d'électricité photovoltaïque en utilisant une optique de concentration (PV concentré à base de AsGa). A moyen terme, les dispositifs optiques à addition d'énergie pourraient voir le jour. Enfin à plus long terme, les dispositifs à bande intermédiaire ou à porteurs chauds, qui posent les plus grandes difficultés scientifiques et technologiques pourraient nous permettre d'approcher les rendements ultimes.

Ces possibilités pourraient voir le jour prochainement grâce à la découverte de nouveaux matériaux, aux propriétés toujours plus étonnantes, dont, mais pas seulement, ceux issus des nanotechnologies. Dans ce monde assoiffé d'énergie, il pourrait bien être nécessaire de tenter l'aventure....



Contexte

La lutte contre les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropogénique, afin de limiter les risques associés au changement climatique et à l'acidification des océans, constitue un des enjeux majeurs du XXIème siècle.

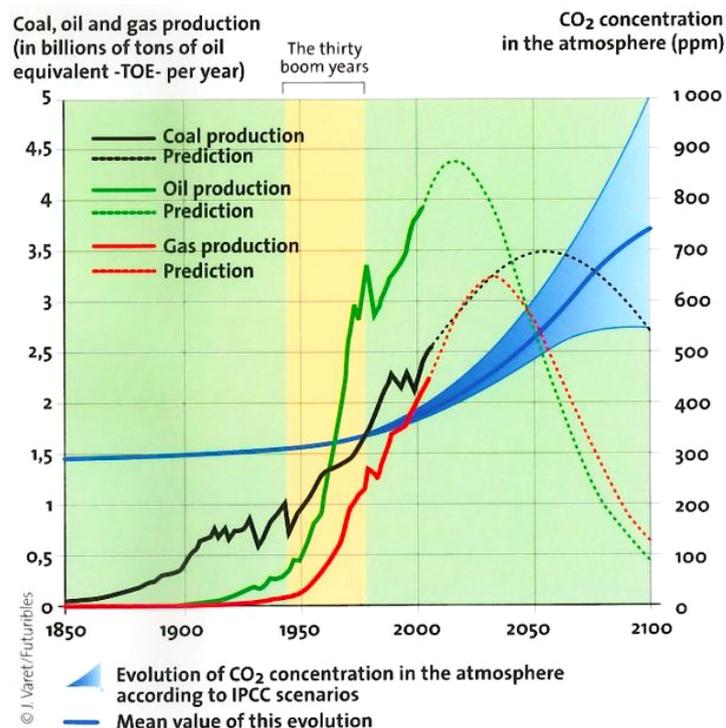


Figure 1: Evolution de la production de combustibles fossiles et de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère entre 1850 et 2003 et prédictions jusqu'en 2100 (source : *International Energy Agency, World Energy Outlook, 2004*).

Parmi les différents composés participant à l'effet de serre (CO₂, CH₄, NO_x, HFC, SF₆...), la priorité est actuellement donnée au dioxyde de carbone, qui présente la contribution majoritaire (typiquement 70 à 75%) à l'échelle de la planète. Les modèles climatiques conduisent à recommander une teneur en CO₂ dans l'atmosphère ne dépassant pas 550 ppm, alors que les différents scénarios d'évolution de la composition de l'atmosphère réalisés par le GIEC (IPCC), représentés à la Figure 1, prédisent une évolution comprise entre 550 et 1000 ppm à l'horizon 2100. Sur le plan national, une diminution d'un facteur 4 des émissions à l'horizon 2050 a été fixée comme objectif à cet effet.

Schématiquement, différents leviers peuvent être proposés afin de réduire les émissions de CO₂ : diminuer la consommation d'énergie, améliorer l'efficacité énergétique, promouvoir les énergies renouvelables ou faiblement émettrices de CO₂, et capter le dioxyde de carbone pour le séquestrer. Il est communément admis qu'aucune de ces options ne peut à elle seule permettre l'atteinte du facteur 4 à l'horizon 2050 pour un pays industrialisé ; la solution passe nécessairement par un bouquet de mesures, parmi lesquelles la technologie CSC (pour Captage et Stockage du CO₂) constitue un levier majeur pour un traitement massif. La valorisation (biologique, chimique) ou la transformation du CO₂ à large échelle, qui présentent un intérêt incontestable et pourraient être la source de marchés spécifiques, nécessitent d'importants travaux exploratoires. Le stockage océanique profond, interdit par la convention de Londres, ne sera pas traité dans ce document.

1. Présentation générale

Le déploiement de la chaîne CSC vise à assurer, préférablement au niveau d'un point d'émission de CO₂ à fort tonnage (typiquement centrales thermiques, aciéries, cimenteries, sites de raffinage...) les étapes suivantes :

- ▀ Captage du CO₂ à l'aide d'un procédé dédié afin d'atteindre le niveau de concentration et le taux de récupération visés. Une teneur supérieure à 90% et un taux de récupération de 90 % sont souvent proposés.
- ▀ Transport sous haute pression (typiquement 100 à 150 bar) dans un pipe-line (appelé carboduc) sous forme supercritique ou liquide.
- ▀ Injection sur un site de stockage (réservoir d'hydrocarbures déplété veines de charbon non exploitables, aquifère salin...)

D'un point de vue pratique, la technologie CSC s'adresse potentiellement, pour des raisons d'économie d'échelle, à des sources d'émission massive de CO₂, qui constituent de l'ordre de 40% des émissions mondiales et sont récapitulées dans le tableau ci-dessous (inventaire réalisé par l'IPCC⁴⁹) :

| | Emissions de CO₂ (en millions tonnes / an) |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Centrales thermiques (gaz, charbon, fuel) | 7660 |
| Sidérurgie | 1440 |
| Cimenteries | 1130 |
| Raffineries | 690 |
| Pétrochimie | 520 |
| Autres secteurs industriels (ammoniac, engrais, gaz naturel...) | 1320 |
| Sous total | 12 760 |
| Autres sources | 14 240 |
| Emissions totales | 27 000 |

Tableau 1: Inventaire des sites d'émission de CO₂ à fort tonnage à l'échelle planétaire par secteur d'activité. Actuellement les pilotes de stockage souterrain de CO₂ en cours d'essai ne prennent en charge qu'environ 10 Mt de CO₂ par an à comparer aux 27 Gt correspondant au total des émissions anthropogéniques⁵⁰. Sur le plan du stockage géologique, de nombreuses études mettent évidence des capacités largement suffisantes partout dans le monde (sauf au Japon et en Corée du sud).

⁴⁹ Davidson, O., Metz, B. (2005) Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, *International Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland, (www.ipcc.ch).

⁵⁰ Par convention, les quantités sont exprimées en tonnes de CO₂ et non en équivalent carbone (eq C) dans ce document (1 t eq C = 3.667 t CO₂).

2. Etat de l'art dans le monde, scientifique et technologique

Historiquement, le transport et l'injection de CO₂ ont été pratiqués sur plusieurs sites en Amérique du Nord (USA et Canada) depuis les années 80 comme technique de récupération assistée du pétrole (EOR pour *Enhanced Oil Recovery*). Plus de 3500 km de *caroducs* sont actuellement en opération dans ce cadre. Le CO₂ injecté est cependant souvent réémis dans une forte proportion avec le pétrole ou le gaz naturel ainsi récupéré. Par ailleurs, le captage du CO₂ est pratiqué depuis des décennies dans le domaine du traitement du gaz naturel.

Plus récemment, la réinjection de CO₂ obtenu sur un site de production de gaz naturel off-shore a été réalisée en aquifère salin sous le plancher de la mer de Norvège (site de Sleipner opéré par la compagnie Statoil) à raison d'environ 1 Mt par an, et ce depuis 1996.

En termes de stratégie de captage, trois voies sont principalement envisagées :

1. La voie *précombustion* consiste à produire à partir du charbon (par gazéification) ou du gaz naturel (par vaporéformage) le mélange CO + H₂ appelé gaz de synthèse. Après réaction de shift avec l'eau on obtient un mélange H₂ + CO₂ dont on extrait le CO₂ par séparation membranaire, par solvant chimique ou physique, ou PSA (Pressure Swing Adsorption). Le CO₂ est, après compression, injecté dans un site de stockage géologique tandis que l'hydrogène est brûlé dans une turbine à gaz de combustion. Un des enjeux technologiques majeur de cette filière est le développement non encore maîtrisé d'une turbine hydrogène de grosse taille
2. La voie *oxycombustion* met en œuvre une combustion avec de l'oxygène à 95 % vol. comme comburant à la place de l'air. Pour maintenir des niveaux de température acceptables dans la chaudière, elle nécessite un recyclage des fumées, le CO₂ se substituant à l'azote comme inerte. En sortie, les fumées produites contiennent essentiellement de l'eau et du CO₂. Après élimination de l'eau, on obtient le CO₂ qui peut être comprimé avant injection dans un stockage géologique. L'oxygène est typiquement produit par séparation de l'air par un procédé cryogénique. Une difficulté liée à cette filière est la pureté du CO₂ et notamment la présence d'incondensables tels que l'azote, l'argon et l'oxygène qui impactent la compression du CO₂. Des démonstrateurs technologiques de taille variable (1 à 30 MWth) sont actuellement opérés (Vattenfal, Schwarze Pumpe, Allemagne; Total, Lacq-Rousse, France).
3. La voie *postcombustion* consiste à extraire le CO₂ des fumées de combustion riches en azote. Des études sont en cours sur l'utilisation d'adsorbants solides mais le procédé le plus étudié est le lavage des fumées par solvant chimique. Le solvant contacte à contre-courant les fumées dans une colonne d'absorption remplie de garnissage avant d'être régénéré dans une autre colonne par stripping à la vapeur, ce qui libère le CO₂ qui peut ensuite être comprimé et injecté dans un stockage géologique. Cette voie postcombustion présente l'avantage d'être plus mature sur le plan technologique et plus adaptée au retrofit d'installations existantes.

Il est à noter que d'autres procédés prometteurs sortant de la typologie précédente sont également étudiés ; on peut citer à titre d'exemple, la technologie dite de *chemical-looping* (cycles thermochimiques mettant en œuvre des masses oxydo-réductrices pour réaliser le transfert d'oxygène, qui conduit de ce fait à des émissions similaires à celles de l'oxycombustion) et la capture *in situ* par des adsorbants solides.

En termes de performances, les études d'intégration des systèmes post-combustion montrent par exemple sur une centrale à charbon moderne, dont le rendement est typiquement de 45%, des **pénalités énergétiques comprises entre 10 et 15 points de rendement**, ce qui est rédhibitoire pour un déploiement massif. Pour les systèmes à base de solvant aminés, les études d'optimisation de l'architecture et les expérimentations sur des nouveaux mélanges de solvant montrent qu'aucune amélioration significative n'est à attendre par cette approche. La recherche de solutions en rupture est donc déterminante.

Sur le plan du stockage, on distingue traditionnellement plusieurs grands thèmes techniques:

- ▀ caractérisation géologiques et capacité des réservoirs
- ▀ "injectivité" du gaz compte tenu des propriétés du réservoir;
- ▀ qualité des scellements: intégrité des couvertures, caractéristiques des puits;
- ▀ possibilité de monitoring;
- ▀ possibilités de "remédiation" en cas de difficulté
- ▀ analyse des risques

On retrouve dans ce domaine beaucoup de compétences pétrolières, toutefois certaines questions dépassent cette compétence:

- ▀ La caractérisation et la réactivité des couvertures
- ▀ La prédiction des phénomènes fortement couplés (mouvements de fluides + mécanique + chimie des interactions eau / minéraux)
- ▀ L'évolution à long terme sur le plan des sociétés humaines.

La caractérisation des sites paraît devoir être assez exigeante, dès les étapes initiales de développement d'un site de stockage. Elle devra faire appel à des simulations numériques aptes à rendre compte de phénomènes couplés dans des systèmes géologiques hétérogènes et complexes, et c'est là un enjeu majeur pour la recherche.

Un inventaire des principaux projets de pilotes en cours est donné au Tableau 2.

| Projet | Opérateur | Lieu | Source de CO ₂ | Taille (Mt/an) | Stockage | Année |
|-----------------------------|----------------|-----------|---------------------------|----------------|-------------------|---------|
| Sleipner | StatoilHydro | Norvège | Gaz naturel | 1 | Aquifère | 1996 |
| Weyburn | Pan Canadian | Canada | Charbon. | 1 | EOR | 2000 |
| In Salah | BP | Algérie | Gaz naturel | 1.2 | Réservoir déplété | 2004 |
| K12-B | Gaz de France | Pays Bas | Gaz naturel | 0.2 | Réservoir déplété | 2004 |
| Zama | Apache | Canada | Gaz naturel | 0.067 | EOR | 2006 |
| Snohvit | StatoilHydro | Norvège | GNL | 0.7 | Réservoir déplété | 2008 |
| Otway | CO2CRC | Australie | Natural Dep. | 0.1 | Réservoir déplété | 2008 |
| Ketzin | CO2Sink | Allemagne | Production H ₂ | 0.03 | Réservoir gréseux | 2008 |
| Decatur | MGSC | IL, USA | Production Ethanol | 0.3 | Aquifère | 2009 |
| Cranfield | SECARB | Miss, USA | Gaz naturel | 1 | Aquifère | 2008-9 |
| Entrada | SWP | COWY USA | Gaz naturel | 1.1 | Aquifère | 2008-12 |
| Fort Nelson | PCOR | Canada | Gaz naturel | 1 | Aquifère | 2011 |
| TAME | MRCSP | OH, USA | Production Ethanol | 0.28 | Réservoir gréseux | 2011 |
| Gorgon | Chevron Texaco | Australie | Gaz | 3.3 | Aquifère | 2014 |
| Ordos | Shenhua group | Chine | Liquéfaction | 1 | Aquifère | 2014 |
| Quest | Shell | Canada | Liquéfaction | 1.2 | Aquifère | 2014 |
| Riley Ridge | Big Sky | WI, USA | Gaz naturel | 0.5 | Réservoir gréseux | 2015 |

Tableau 2 : Principaux projets pilotes de stockage de CO₂ au niveau mondial (source: MIT (2009) http://sequestration.mit.edu/tools/projects/storage_only.html)

Par ailleurs, un inventaire récent fait état de 140 initiatives au niveau mondial à l'échelle pilote et démonstrateurs dans le domaine du CSC (en opération ou sur le point d'être lancées).

3. Les principaux acteurs mondiaux et leurs atouts

Les travaux de recherche et de déploiement technologique dans le domaine du CSC sont nombreux et présentent de nombreuses facettes : R&D dans les grands groupes industriels, programmes de recherche nationaux (par exemple les programmes du *Department Of Energy* aux USA, RITE au Japon, ANR en France...) ou européens (FP6, FP7).

Au niveau mondial on assiste à une accélération récente des recherches aux USA avec une approche beaucoup plus pragmatique, ainsi qu'à un fort développement en Chine et dans les pays charbonniers en général (Australie par exemple).

Sur le plan national, on trouve de nombreux acteurs publics ou privés engagés dans des opérations de R&D sur cette thématique. Une liste, non exhaustive⁵¹, est proposée à titre illustratif, au Tableau 3, pour les principaux participants aux projets ANR et Européens (FP6 et FP7).

| Principaux acteurs | |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Captage | Arcelor-Mittal, Alstom, Air Liquide, GDF-Suez, EDF, Lafarge, Total, Tredi, Veolia... IFP, Armines CNRS (IMFT, LGC, LFC, LSGC, IRCELyon, LTIM, LET, Institut Lavoisier, MADIREL, LRRS, LMOPS...), Universités |
| Transport | Air Liquide, GDF-Suez, Saipem, Vallourec IFP, Armines |
| Stockage | Schlumberger, CGG-Veritas, Geostock, Messer... BRGM, IFP, INERIS CNRS (IPGP, LMTG, G2R, ICMCB, LAEGO, LMPM), Universités |

Tableau 3 : Principaux acteurs nationaux des projets de recherche et développement sur le captage, le transport et le stockage du CO₂.

4. Structure et forces/faiblesses de la recherche en France

Forces

- ▀ Forte tradition pétrolière et parapétrolière en France, ce qui est un atout, notamment pour le stockage en situation offshore.
 - ▀ Acteurs industriels de premier plan sur la thématique au niveau mondial
 - ▀ Existence d'un réseau d'échange au niveau national (Club CO₂) depuis 2002
 - ▀ Création d'un Groupe d'Analyse Thématique dédié au sein du programme Energie CNRS depuis 2005
 - ▀ Compétences offrant une connaissance intégrée de la chaîne allant du captage au stockage
- Mise en place d'une pluri-disciplinarité, assez bien structurée grâce :
- ✓ aux initiatives du Réseau des Technologies Pétrolières et Gazières
 - ✓ au programme de l'Agence Nationale de la Recherche (2005-2008 : 33 projets pour un budget de 27M€)

⁵¹ Pour un descriptif plus complet, se référer à l'inventaire réalisé récemment par le Club CO₂ pour les projets nationaux et européens (<http://www.clubco2.net>)

- ▀ Soutien des projets R&D par l'ADEME (aide allouée depuis 2004 environ 3 M€ pour un coût total des projets correspondants à environ 16 M€).
- ▀ Plusieurs démonstrateurs: Lacq et Fonds Démonstrateur de Recherche sur le CSC⁵²
- ▀ Exploration de procédés originaux de captage (ex: anti-sublimation: EDF/Armines)
- ▀ Existence d'une base nationale centralisée sur les données du sous-sol (BRGM)

Faiblesses

- ▀ La France est un pays ayant fait des choix énergétiques (notamment nucléaire) ne l'ayant pas amené à privilégier le CCS à l'opposé des pays misant à court et moyen terme sur le charbon (USA, Allemagne, Chine, Inde, ...)
- ▀ Un non renouvellement durable de l'appel d'offre de l'ANR concernant le CO₂ peut conduire à une démobilisation de la communauté scientifique et technique.
- ▀ Pas de coordination suffisante sur les pilotes (ADEME/ANR): la dynamique impulsée par l'ANR risque de ne pas bénéficier pleinement aux démonstrateurs (et inversement !)
- ▀ Une implication insuffisante des grands acteurs industriels dans les projets de recherche nationaux
- ▀ Une place à reconquérir par les équipes académiques sur certaines thématiques
- ▀ Absence d'une plateforme ou d'un site pilote instrumenté pour de la recherche scientifique
- ▀ Pas d'inventaire national complet des capacités de stockage en aquifère.

5. Les défis les plus critiques à relever

Pour les procédés de captage

Il est important de souligner en préambule que dans leur état de développement actuel, aucune des trois principales voies de captage ne possède un avantage déterminant tant sur le plan de la pénalité énergétique que sur le plan des coûts.

Au niveau du captage les priorités concernent :

- ▀ L'amélioration des performances intrinsèques des technologies de captage de sorte à minimiser la dépense énergétique induite par ces procédés pour abaisser les coûts de captage d'un facteur 2 à 3 (de 50-70 €/tonne de CO₂ évitée à environ 20-30 €/tonne de CO₂ évitée⁵³).
- ▀ La recherche des meilleures possibilités d'intégration du poste de captage dans une installation de production industrielle à moindre coût énergétique. Un objectif typique consiste à développer une technologie nécessitant moins de 2 GJ par tonne de CO₂ récupéré⁵⁴. En effet, les procédés de captage de première génération nécessitent actuellement environ 3.5 GJ(th) par tonne de CO₂ récupérée, ce qui induit une baisse d'efficacité de 10 à 12 points pour une centrale de production d'électricité⁵⁵. Ainsi, pour une centrale thermique fonctionnant au charbon avec un rendement moyen de 46% sans capture, l'efficacité chutera à environ 34-36% avec capture.

⁵² Lancé par la France en 2008 et dont la gestion a été confiée à l'ADEME. 5 projets ont été proposés dont 2 sur le captage, 1 sur le stockage et 2 projets intégrés portant sur l'ensemble de la chaîne CSC.

⁵³ Les principaux verrous technologiques à lever pour atteindre ces objectifs sont :

pour le captage en postcombustion :

réduire l'énergie nécessaire à la régénération des solvants, développer des nouveaux contacteurs, développer des membranes, optimiser l'apport d'énergie et réduire les pertes thermiques du procédé global,

pour le captage en oxycombustion :

produire l'oxygène à grande échelle et à bas coût, comprendre les phénomènes de combustion, améliorer la durée de vie des oxydes métalliques pour les cycles thermochimiques, ...

pour le captage en précombustion :

réduire les coûts d'investissement, garantir la fiabilité des installations, développer de nouvelles techniques de combustion pour les gaz riches en hydrogène, ...

⁵⁴ Deschamps P., Pilavachi P. A. Research and development actions to reduce CO₂ emissions within the European Union. *Oil & Gas Science and Technology* 2004; 59 (3) : 323-330

⁵⁵ Rochelle, G.T. (2009) Amine scrubbing for CO₂ capture. *Science*, 325, 1652-1653.

- ▀ L'évaluation de l'impact environnemental global des installations (idéalement à l'échelle du démonstrateur) : émissions gazeuses, déchets solides et liquides, consommation d'eau et de produits chimiques, besoins d'une filière nouvelle de production/élimination des solvants, ou production in-situ...
- ▀ Le devenir des composés minoritaires (O₂, Ar, SO_x, NO_x...)
- ▀ La prise en compte des spécificités sectorielles et des procédés de capture les plus adaptés à chaque cas (par exemple cimenterie, sidérurgie, centrale thermique au gaz naturel, au charbon...)
- ▀ Les besoins liés à la préservation de la manœuvrabilité des installations de production d'électricité.

D'autres besoins pour des travaux de recherche à caractère plus prospectif et relevant de la recherche de solutions de rupture, peuvent également être identifiés :

- ▀ Les études associant intimement combustion et capture (combustion sous pression, procédés hybrides...), ou les technologies de traitement associant élimination des SO_x, NO_x et du CO₂.
- ▀ Les travaux sur les technologies de 2^{ème} et 3^{ème} génération
- ▀ La conversion ou la valorisation du CO₂ (par voie catalytique, enzymatique, microbienne, par culture d'algues⁵⁶...).
- ▀ Les technologies de captage du CO₂ à partir de l'air⁵⁷
- ▀ Sur un plan plus large, la question de l'échelle de puissance (ou le tonnage en CO₂) à partir de laquelle la filière CSC est acceptable sur le plan technico-économique reste à identifier. Si la priorité reste la recherche de technologies de traitement des émissions à partir des sites à fort tonnage, des travaux touchant à la problématique des *émissions diffuses* en partenariat avec les secteurs industriels concernés (automobile, chauffage domestique) mériteraient également d'être entrepris.

Pour le transport

Parmi les principaux verrous à lever, on peut citer une meilleure connaissance de la thermodynamique du CO₂ en présence d'impuretés, et une meilleure connaissance des conditions et matériaux limitant la corrosion.

Pour le stockage souterrain

Le stockage géologique du CO₂ peut constituer un verrou pour la filière CSC car il se situerait sur le chemin critique du déploiement de la filière, et soulève des questions non triviales liées à la perception du public de la solution.

Les questions environnementales-clés sont liées au caractère réactif du CO₂ injecté avec les roches environnantes, au devenir à long terme du CO₂ et à la capacité d'une surveillance des sites de stockage (notamment l'impact éventuel des fuites de CO₂ sur les nappes d'eau potable).

Si des approches méthodologiques, à base de modélisation 3D des sites et de monitoring, sont aujourd'hui proposées dans les textes à vocation réglementaires, elles nécessitent d'être validées et qualifiées sur des expériences de terrain qui sont relativement rares aujourd'hui.

⁵⁶ La production de biodiesel par les microalgues est actuellement fortement médiatisée (vol d'un Boeing ou utilisation dans des voitures). En effet ces algues microscopiques sont de véritables centrales biochimiques de conversion de l'énergie solaire qui captent le CO₂ pour produire des sucres et des triglycérides valorisés en biocarburant. Pour atteindre un rendement optimal, les algues ont besoin de CO₂ en grande quantité dans des bassins ou des bioréacteurs. Ces derniers peuvent être couplés à des centrales à charbon qui rejettent du CO₂ avec une teneur moyenne de 13%. Cette technologie permet de recycler le CO₂. La biomasse obtenue peut servir à produire du biodiesel, du plastique, des molécules d'intérêt pharmaceutique ou être réintroduite comme combustible dans la centrale. Au niveau international, des investissements importants sont annoncés pour la production de microalgues (par exemple, EXXON Mobil 600 M€...). Concernant la France, elle se place au 4^{ème} rang pour les brevets après les USA, le Japon et la Chine et en 9^{ème} position pour les pays d'application. Toutefois parmi les organismes de recherche cités, c'est le CNRS qui arrive en tête avec 200 publications ou brevets devant le SCIC (Espagne), le CSIRO (Australie) et l'IFREMER (France) avec plus de 100 publications. En conclusion, malgré une situation de tout premier rang au niveau de la recherche, la France ne représente que 5% des investissements sur les projets dans ce domaine et il est urgent de transférer les connaissances scientifiques vers l'industrie.

⁵⁷ Voir par exemple les travaux réalisés par l'université de Calgary dans ce domaine (Keith, D.W. (2009) Why capture CO₂ from the atmosphere ? *Science*, 325, 1654-1655)

En amont la recherche scientifique doit se poursuivre sur :

- ▀ le comportement du CO₂ en contact des roches et des fluides des milieux géologiques visés.
- ▀ Les techniques avancées de monitoring, permettant de détecter et d'anticiper les faibles fuites.
- ▀ Les voies permettant d'accélérer la fixation définitive du CO₂ dans le sous-sol

Géomécanique

L'injection de CO₂ dans le système poreux se traduit par le déplacement ou la compression des fluides préalablement présents, répondant à l'augmentation de pression. Dans le cas d'un champ déplété cela peut se traduire par la production additionnelle d'huile.

Dans le cas d'un champ déplété et dépressurisé l'injection de CO₂ peut s'entendre avec une remise en pression partielle (par rapport à la pression avant production), avec donc un degré de sécurité quant à la tenue des couvertures et le jeu des failles ou fractures du réservoir.

Dans le cas des aquifères salins profonds la dépressurisation préalable n'existe pas et l'injection, lorsque le débit sera supérieur au déplacement des fluides en place, se traduira par une augmentation, au moins locale de pression, interférant avec l'injectivité et susceptible de rouvrir des fractures ou des failles. Pression qu'il sera nécessaire de relâcher par la production d'eau. Cette situation doit être prise en compte pour l'évaluation des débits et des capacités de stockage, mais également pour anticiper les problèmes de gestion de l'eau produite

Géochimie

Dissolution, mobilisation, transport, précipitation d'espèces chimiques

Conséquences pétrophysiques, géochimiques et mécaniques de l'assèchement des milieux poreux carbonatés et gréseux (phénomènes de carbonatation, de sulfatation et de déshydratation aboutissant ou pas à des transformations minéralogiques.

Géomécanique –Géochimie

Action de la présence de CO₂ sur les remplissages de failles (souvent carbonatés) et le re-jeu possible de ces dernières

Thermodynamique

Réaction fluides roches et études des phases aux abords des puits

Tenue des couvertures (qui, la plupart du temps, contiennent des carbonates,)

Rôle des gaz annexes lors de l'injection du CO₂

Propriétés thermodynamiques des mélanges CO₂-eau-sels-gaz annexes en condition de stockage géologique

Risque de formation d'hydrates

Sédimentologie

Architecture sédimentaire des aquifères: mise en place d'une méthodologie de caractérisation équivalente (mais à l'échelle du bassin) à celles utilisées pour les descriptions de réservoir pétroliers

Ciments / puits

Les points faibles des stockages restent les puits avec leur garniture de ciment et la zone la plus sensible du dispositif souterrain est le volume du réservoir situé à proximité du puits.

Incidence des mélanges CO₂, impuretés sur la colonne de puits en conditions opérationnelles

Mécanismes d'altération de ciments par du CO₂ (notamment en présence de gaz annexes: H₂S, SO₂...)

Études prospectives sur de nouvelles classes de matériaux plus résistants aux gaz acides

Comportement du champ proche puit lors de l'injection de CO₂

Couverture

Amorçage et propagation des réseaux de fractures, rôle sur l'étanchéité des couvertures

Évolution des fractures et régime temporel de la perméabilité

Transformation minéralogique des argiles en présence de CO₂

L'évolution géochimique à long terme des couvertures reste un verrou majeur

Monitoring

Méthodes Géophysiques (Sismiques, électromagnétiques, électriques)

Devant être robustes et peu coûteuses: instrumentation (capteurs) et mise en oeuvre, (notamment pour la sismique passive)

Compréhension des propriétés sismiques des fluides riches en CO₂, des milieux poreux fracturés contenant de tels fluides et des hétérogénéités dues aux accumulations de CO₂ à l'interface réservoir-couverture

Estimation des possibilités d'utilisation de l'Electromagnétisme pour la surveillance des stockages de CO₂

Évaluation de la résistivité des roches réservoir imprégnées de CO₂ dans les conditions de stockage

Méthodes géochimiques

Identification et mise en oeuvre de traceurs naturels (tels que les gaz rares) avec surveillance d'aquifères de référence.

Un verrou générique majeur à ne pas négliger

Au delà des aspects scientifiques et techniques, l'un des points les plus durs pour le déploiement de stockages souterrains est l'acceptation sociétale. Une recherche substantiellement accrue dans le domaine des "Sciences Humaines et Sociales" est incontournable.

6. Pistes de partenariat à privilégier

Il faut plus généralement, améliorer en France, dans ce domaine, le partenariat organisme de recherche-industrie.

La préservation des partenariats mis en place lors des programmes RTPG et ANR est, de ce point de vue, capitale.

Il est également crucial d'utiliser les partenariats entre organismes de recherche et industrie autour des pilotes ou des démonstrateurs en cours ou à venir au travers d'une concertation forte avec les industriels opérateurs. Ces pilotes et démonstrateurs ne manqueront pas de soulever des points de recherches qu'il faudra être à même de traiter et qui permettront également de contraindre et valider les modèles établis à l'échelle du "laboratoire".

Une réflexion sur les outils de programmation et sur les modalités de partenariats adaptés semble incontournable.



La Socio-économie de l'Énergie

Dans le cadre d'un projet exploratoire (PRICAPE) du programme interdisciplinaire *énergie* du CNRS, le CIRED et le LEPIL ont fait le bilan de l'état de l'art en matière de modélisation et de prospective socio-économique pour évaluer les capacités à éclairer les conditions d'une transition énergétique à engager à court-moyen terme pour respecter les contraintes carbone du long terme. Cette évaluation des capacités en matière de prospective tient aussi compte des autres dimensions du développement durable que sont la sécurité énergétique, la réduction de la pauvreté et la formation d'un mode de développement urbain et rural compatible avec les contraintes environnementales à l'échelle globale et locale.

L'enjeu central est (i) d'éclairer les conditions de développement, de diffusion et de viabilité des nouvelles technologies énergétiques, (ii) de se donner les moyens de mieux cerner et anticiper les ruptures et transitions socio-économiques qui structureront les étapes institutionnelles vers un système énergétique propre et durable (iii) de cibler l'orientation des efforts de recherche et de recherche et développement, et (iv) de détecter les travaux de recherche à mener en matière socio-économique sur les conditions institutionnelles qui doivent accompagner la sélection et le déploiement des alternatives technologiques.

Sur la base des résultats intermédiaires de ce travail qui doit s'achever en avril 2010, les deux équipes ont dégagé un diagnostic dont ils pensent pouvoir tirer un ensemble de **recommandations stratégiques pour le CNRS**. Cette note ne prétend pas couvrir la totalité de ces recommandations (qui portent sur des éléments plus structurants comme les questions de politique d'embauche et de politique de recherche), elle se centre sur la proposition centrale d'un changement de paradigme énergétique imposé par la montée des contraintes de ressources et d'environnement global.

1. Une mutation technologique à réussir sous contraintes multiples

L'énergie est au cœur des enjeux du développement durable : diminution des ressources pétrolières, impératif de croissance des pays émergents, sécurité d'approvisionnement dans un monde instable politiquement, prix dépendants des aléas géopolitiques et des mouvements spéculatifs, fourniture des besoins de base de populations marginalisées et fragiles, risques du changement climatique et conséquences d'une contrainte globale d'émission sur l'économie.

De là émerge un **agenda de recherche** qui doit conduire à explorer les moyens de faire face aux tensions immédiates, tout en organisant la bifurcation de nos systèmes énergétique vers :

- ▀ des modes de consommation fondés sur une utilisation plus sobre, plus efficace et plus intelligente des énergies, y-compris à travers de nouveaux systèmes et réseaux énergétiques (les réseaux intelligents ou smartgrids) ;
- ▀ des infrastructures et réseaux d'offre d'énergie fondés sur une utilisation plus systématique des énergies-flux renouvelables (supergrids) et une exploitation plus limitée et moins agressive pour l'environnement des énergies-stocks.

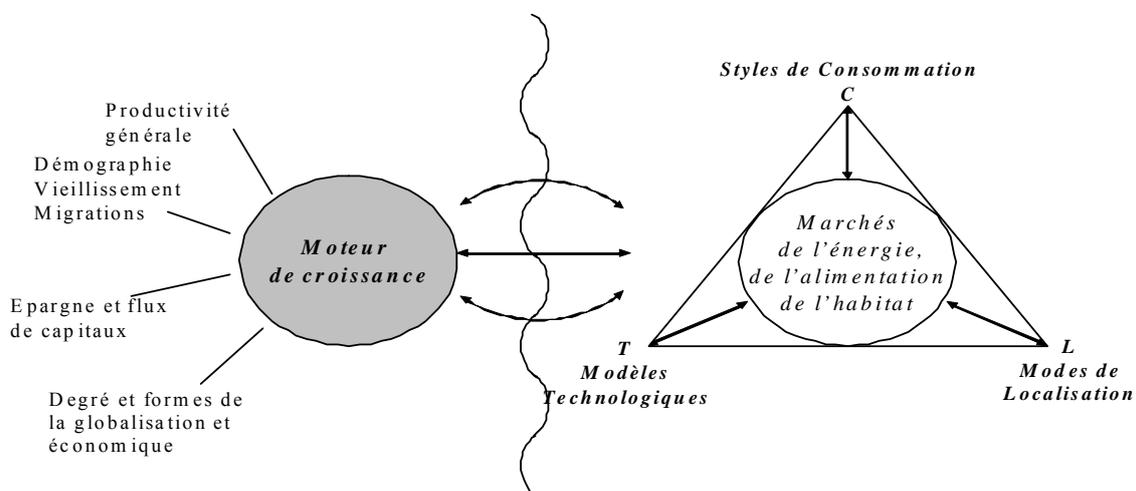
Cet agenda doit tenir compte du fait que cette bifurcation doit s'opérer dans un contexte spécifique : opposition dans certains cas à des filières technologiques majeures (nucléaire, bioénergie, capture et stockage du carbone), réflexes Nimby (lignes hautes tensions, éoliennes), hausse du risque d'investissement en raison de l'incertitude sur les nouvelles formes de régulation des systèmes énergétiques, controverses sur les objectifs ultimes de limitation des concentrations de GES. Or ce contexte pèse sur la recherche elle-même qui, alors qu'elle vise le temps long, est confrontée aux attentes de la société et à des oscillations entre phases de dénégation des problèmes et phases d'émergence d'un sentiment d'urgence qui pousse à décider 'en méconnaissance de causes' sur fonds de pression médiatique.

2. Un besoin de prospective intégrée : systèmes naturels – technique – économie – institutions

Dans ce domaine, comme d'ailleurs sur toutes les autres frontières de l'innovation, on ne peut plus s'en tenir aujourd'hui au schéma classique qui va de la recherche fondamentale et de l'invention aux procédés industriels, en passant par la R&D. La viabilité des grandes filières techniques candidates à répondre aux enjeux du XXI^{ème} siècle dépendra en effet:

- ▀ de la nature des systèmes énergétiques dans lesquelles elles s'inscriront dans l'emboîtement **des échelles locales, nationales et globales**, des degrés d'autonomie et d'interdépendance entre ces échelles, et des marges de manœuvre laissées par l'inertie des systèmes actuels,
- ▀ des **systèmes techniques** dans lesquels les technologies énergétiques sont appelées à s'insérer : cadre bâti (type d'habitat, type d'architecture) ; usages des sols et infrastructures de transports ; agriculture (pour l'offre de bioénergie) ; systèmes industriels (innovations de produits, de procédés et de « système » pour la dématérialisation de l'économie),
- ▀ de **paramètres économiques** centraux comme les capitaux disponibles pour financer les investissements, le niveau de demande finale des ménages et les systèmes de prix relatifs des biens, des ressources et des facteurs de production
- ▀ des **comportements individuels et collectifs** en matière de perception et acceptation des risques technologiques mais aussi en matière de styles de consommation et de nouveaux usages ou de formes urbaines et d'aménagement du territoire.

Figure 2 : Fondamentaux de la croissance et structures des systèmes économiques



3. Un nouveau chantier scientifique : les modèles « hybrides » au service du dialogue interdisciplinaire

Le paradigme de modélisation prospective déclenché par le rapport du Club de Rome et le premier choc pétrolier est aujourd'hui parvenu à un point de basculement. Il restait marqué par une coexistence entre des perspectives technologiques de filières, des modélisations sectorielles, comportant une modélisation explicite des systèmes techniques mais raisonnant à système économique constant, et des modèles macroéconomiques intégrant les interdépendances économiques, mais au prix d'une représentation trop frustrée des systèmes techniques.

Ce dispositif intellectuel arrive à ses limites dès lors que les mutations à envisager sont telles qu'on ne peut plus supposer a priori que les basculements techniques n'auront pas d'impact sur la 'machine économique' et que les régulations économiques n'auront aucune conséquence sur les trajectoires technologiques. C'est ce diagnostic qui pousse aujourd'hui des équipes-leader à l'échelle internationale à s'engager dans la voie de modèles « hybrides » (Energy Journal, Special Issue, Oct. 2006) dont la vocation est de garantir un dialogue interdisciplinaire rigoureux entre :

- ▀ **économistes et ingénieurs**, pour s'assurer que la prospective technologique travaille sur des systèmes techniques sous-tendus par des économies cohérentes et plausibles et que la prospective économique puisse expliciter le substrat matériel des flux économiques et leur inscription géographique ;
- ▀ **modélisation prospective et sciences humaines et sociales**, pour intégrer une description des comportements individuels et collectifs qui soit moins stylisée et plus réaliste que l'optimisation en anticipation parfaite et qui tienne compte du jeu des institutions ;
- ▀ **les communautés scientifiques mobilisées sur les secteurs de l'énergie, de l'habitat, des transports, de l'agriculture et des grands secteurs industriels**, qui ont jusqu'ici travaillé de façon parallèle et avec peu d'interaction

Des avancées récentes, comme les couplages entre les modèles IMACLIM (CIRED) et POLES (LEPII) (ou les modèles SGM, EPPA aux USA, ou encore le modèle REMIND au PIK) montrent que les principes de tels modèles hybrides sont suffisamment maîtrisés pour que l'on sache où se situent les percées à opérer, en particulier en matière de contraintes calculatoires: représentation des déséquilibres dus aux frictions entre systèmes de temps caractéristiques différents, maîtrise de la propagation des incertitudes, intégration d'échelles.

De même, l'expérience conduite pendant trois ans entre le LEPII, le CIRED et ENERDATA dans le cadre du projet « scénarios sous contraintes carbone » mené dans le cadre de la FONDDR1 avec l'appui du consortium *Entreprises pour l'environnement* montre l'intérêt de telles structures pour un dialogue entre scientifiques et experts du monde industriel.

Enfin, des développements en cours (projet ANR Villes durables du LEPII, projet Européen Globis au CIRED) conduisent à explorer – dans des systèmes de représentations homogènes à ceux des modèles globaux et en s'appuyant sur des approches économiques robustes – les échelles plus locales des politiques urbaines et des plans climat territoriaux.

Figure 3 : Pour des modèles économiques plus complets

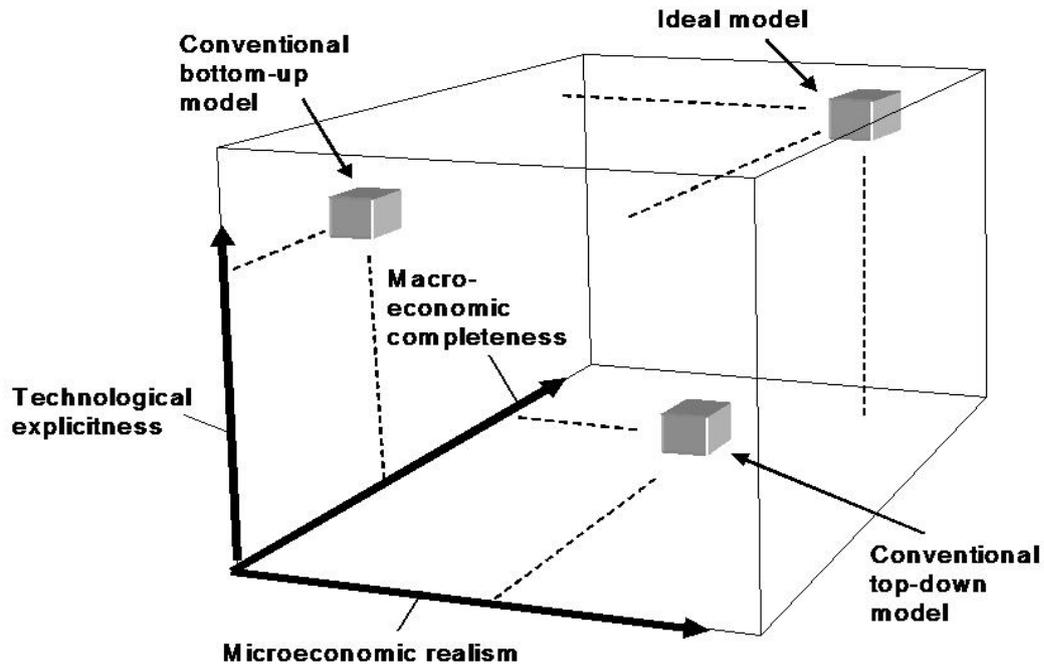
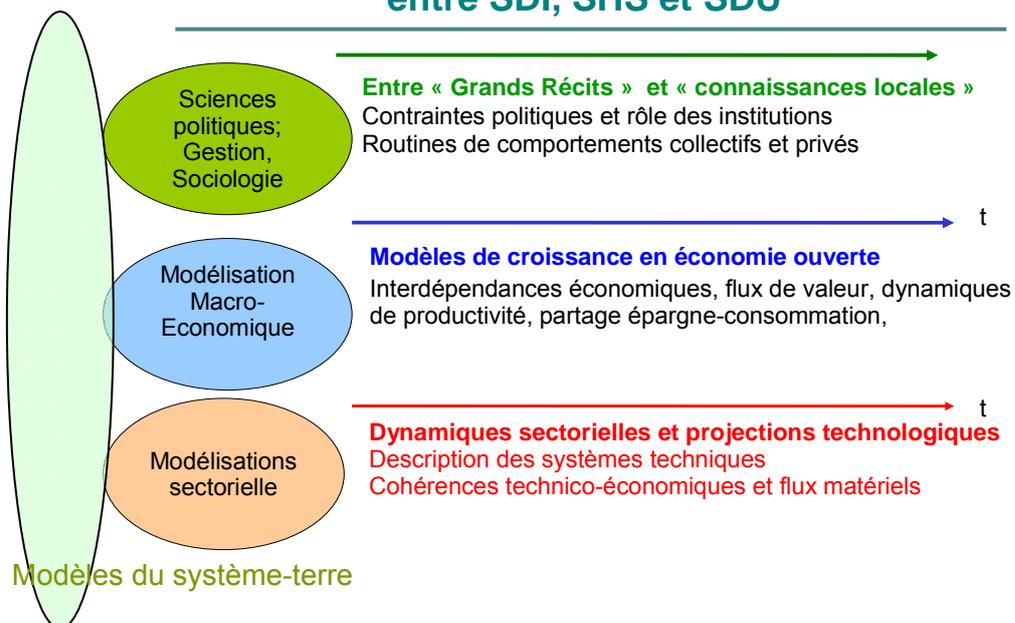


Figure 4 : les voies de la modélisation hybride

La modélisation hybride: un outil de dialogue entre SDI, SHS et SDU



4. Vers une plate-forme de prospective énergétique intégrée

Il est nécessaire que la France se dote d'une plate-forme de prospective intégrée « énergie, technologie, économie et environnement » fondé sur des outils complémentaires et en dialogue, de façon à :

- ▀ maîtriser les grands choix technologiques du futur ;
- ▀ ne pas rater l'émergence d'un courant de travaux majeurs sur les questions d'énergie et de développement durable ;
- ▀ assurer sa présence dans les grands lieux d'expertise (GIEC, BM, AIE, EU) par la formation de cadres internationaux formés par la recherche et en nombre suffisant.

La plate-forme qui en serait le support constituerait un **investissement lourd et de long terme en capital humain** via la mobilisation de compétences de haut niveau, de bases de données cohérentes constituant un bien public pour toutes les disciplines et de « moyens de calcul » et mathématiques appliqués. Dans le contexte français, le CNRS doit être l'opérateur central de cette plate-forme :

- ▀ de part sa position de **neutralité du point de vue des filières en compétition** et de sa capacité de programmation scientifique indépendamment des « modes » et des « urgences » ;
- ▀ de part sa capacité à dégager sur la durée des communautés interdisciplinaires dotées d'une culture prospective appartenant aux départements EDD, STI, SDU et SHS et aux instituts INSHS, INEE, INSU et INSIS.

Il peut devenir cet opérateur en s'appuyant de manière non limitative, sur l'existence en son sein de deux équipes, le CIRED (Paris) et le LEPII (Grenoble), qui sont :

- ▀ présentes, de façon complémentaire, dans les grands lieux d'expertise internationale depuis les années quatre-vingt (AIE, Banque Mondiale, GIEC, Communautés Européennes, administrations françaises et européennes) ;
- ▀ engagées depuis longtemps dans un effort commun de modélisation hybride et dans un dialogue avec les sciences de l'univers et les sciences de l'ingénieur (en amont par les efforts de modélisation intégrée (CIRED), en aval par ceux portant sur les bases de données technologiques (LEPII), en interface par l'accent mis sur la modélisation précise et cohérente du progrès technologique induit par les contraintes environnementales;
- ▀ les chevilles ouvrières d'opérations de long terme comme la Chaire Paristech⁵⁸ (Mines-Ponts de modélisation prospective pour le CIRED) appuyés par un consortium d'entreprises (EDF, TOTAL, AREVA, ADEME, SCHNEIDER), le programme de la FONDRI sur les enjeux industriels de la décarbonisation de l'économie ; ou encore le projet SEED – Sociologie et Economie pour une Energie Durable – du futur pôle de recherche et d'enseignement Energie de Grenoble, associé au pôle de compétitivité énergies renouvelables et distribuées TENERDIS, également basé à Grenoble ;
- ▀ insérées dans un réseau de collaboration avec des équipes partageant des préoccupations similaires et apportant des compétences complémentaires sur le secteur des transports (LVMT de l'ENPC et de l'INRETS, LET (CNRS-ENTPE), du bâtiment et de l'urbanisme (réseau EDUD, économie du développement urbain durable, avec le CSTB, le CERNA et l'IDDRI), ou, pour la prospective agricole mondiale, le programme Agrimonde avec le CIRAD.

⁵⁸ Chaire construite conjointement entre le CIRED et le CMA (dirigé par Nadia Maïzi) et cofinancée par Total, l'Ademe, Renault, EDF et Schneider Electric.

5. Sciences, technologies, industries, économie : questions interdisciplinaires stratégiques

Dans le contexte de la création de l'ANCRE, le programme Energie du CNRS 2009 peut porter un certain nombre de domaines stratégiques dans lesquels les coopérations entre sciences de l'univers, sciences de l'ingénieur et sciences de l'homme et de la société devraient se développer en priorité. Les travaux de prospective déjà effectués, les coopérations interdisciplinaires déjà opérantes permettent déjà d'en identifier un certain nombre :

1. Une **croissance économique sous contrainte environnementale** devra assurer un découplage croissant entre activité économique d'une part, et consommation d'énergie et de matières premières, d'autre part ; cela mobilise un ensemble de recherches qui vont des techniques et méthodes de l'éco-conception (Analyses du Cycle de Vie, Material Flow Analysis ...) à l'étude des conditions économiques et sociologiques d'une mutation de la gestion industrielle vers l'économie de la fonctionnalité et de l'évolution des comportements d'usage de l'énergie et des styles de consommation.
2. Les recherches dans le domaine des technologies énergétiques devront prendre en compte la nécessité d'**intégrer une part croissante d'énergies-flux, intermittentes et aléatoires**, et donc accorder une importance marquée aux questions de stockage, de transport longue distance et d'algorithmes de gestion des réseaux énergétiques ; l'intégration des smartgrids, des supergrids et de capacités de stockage de différents types est la condition d'une contribution significative des énergies renouvelables au bilan énergétique.
3. **Pour les transports**, l'articulation entre nouveaux équipements de transport individuel (Véhicules Zéro-Emission, petits véhicules urbains), nouvelles orientations des aménagements urbains et des usages des sols (gestion de l'étalement), promotion de nouveaux comportements (covoiturage, véhicules en temps partagé) et amélioration des transports collectifs est la condition d'une inflexion durable des consommations et des émissions associées ; ce domaine constitue un exemple-type de la nécessité d'interfaces pluridisciplinaires de type « technologies, sociologie des usages, urbanisme et aménagement, nouveaux modèles économiques ... »
4. **Le bâtiment** constitue l'un des domaines-clé pour la réduction massive et durable des émissions de GES ; il est d'autant plus stratégique que les constantes de temps sur les équipements et les temps de renouvellement des parcs y-sont élevés ; les problématiques de la diffusion du Bâtiment Basse Consommation et du Bâtiment à Energie Positive sont explicitement traitées dans le Grenelle de l'environnement ; le respect des objectifs dans ces domaines suppose la mise en œuvre de solutions multiples au niveau de la conception, de l'instrumentation, des comportements de l'utilisateur (domestique ou tertiaire) ; le succès dans cette intégration des solutions suppose une intégration satisfaisante des connaissances dans ces différents domaines.
5. **L'agriculture** est, après celui de l'énergie, le deuxième grand secteur émetteur de GES ; le succès des politiques Facteur 4 en 2050 (ou bientôt 5, pour 80% de réduction des émissions) suppose que des progrès considérables soient accomplis, à travers de nouvelles politiques de gestion des sols (et des stocks de carbone associés), de nouvelles pratiques agricoles qui seront probablement impactées par des signaux économiques sur le coût du carbone mais, mais aussi par la nécessité de changements dans les comportements des consommateurs (part des protéines animales, achat local ou global, biologique ou OGM ...)
6. La définition et l'évaluation des **systèmes de régulation économique et des politiques publiques** à même de porter ses évolutions en tenant compte à la fois des spécificités de chaque secteur (le secteur électrique n'est pas porté par les mêmes logiques micro-économiques que le secteur agricole) et des cohérences macro-économiques qui les encadrent : fiscalité, politiques tarifaires, financement dans un contexte de dette publique croissante, questions de compétitivité internationale.
7. C'est pourquoi la **dimension internationale de l'ensemble des bifurcations** évoquées ci-dessus ne peut être ignorée, tant du point de vue des questions évidentes de la coordination et de la gouvernance du régime international que de celui des enjeux industriels du développement international des technologies, avec les effets d'apprentissage associés ou les questions de droits de propriété intellectuelle et/ou de financement qui en découlent.
8. ...

* * *

Compte-tenu de l'urgence des bifurcations à conduire pour l'inscription des systèmes sociotechniques sur une trajectoire de type Facteur 4, la constitution d'une plate-forme de Prospective pour l'Energie doit être très rapidement engagée. Cela afin que la mobilisation des équipes concernées puisse être pérennisée et afin également que la démarche d'ouverture vers d'autres partenaires (recherche et EPICs dans l'ANCRE, partenaires industriels) puisse être entreprise sans attendre. Cette plate-forme pourra alors jouer un rôle stratégique dans la perspective tant de la mise en œuvre des politiques publiques en France et en Europe (loi du Grenelle de l'environnement, « trois fois vingt » européen) que de la conduite des négociations internationale (négociations post-Copenhague).



Les contraintes sur les Agro-Carburants

Préambule

Après l'engouement initial conduisant à considérer les agro-carburants (de Génération1) comme une ressource énergétique renouvelable, des doutes sont apparus sur le gain réel en émissions de gaz à effet de serre (EGES) ainsi que sur le gain énergétique réel. La polémique s'est ensuite installée à propos de la concurrence avec les cultures vivrières. Il s'en est suivi une situation très confuse dans l'opinion publique mais aussi dans le monde scientifique et cela a conduit à missionner le groupe de travail GT 3A pour répondre à la question suivante :

« Qu'en est-il de la pertinence de développer la voie des agro-carburants en termes de solution partielle à une autonomie énergétique, en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en termes d'incidence sur l'alimentation de l'humanité ? »

Le rapport du GT3A est bien avancé, mais pas encore finalisé et les données numériques doivent être validées. En voici cependant les principales conclusions.

Contexte

- La question ci-dessus se pose dans un monde qui doit changer drastiquement :
- ▀ Réduction des EGES (Monde -50%, OCDE -75%) en 40 ans
 - ▀ Modification profonde du mix énergétique pour réduire les EGES, et faire face à une demande énergétique qui va doubler d'ici 2050
 - ▀ Raréfaction du pétrole (peak oil), la plus flexible des énergies fossiles (caractère stratégique des carburants liquides).
 - ▀ Augmentation de la population mondiale de 6,5 à 9 milliards d'habitants en 2050
 - ▀ La problématique 3A Agriculture, Alimentation humaine, Agro carburants doit donc être analysée dans sa globalité et ce, en se projetant jusqu'en 2050.

Le rapport a été organisé en 3 chapitres principaux

- ▀ **Agriculture** (productions, usages) **et alimentation humaine**
- ▀ **Agriculture** (productions, usages), **coûts et potentialités énergétiques**
- ▀ **Agriculture** (productions, usages) **et émissions de Gaz Effet Serre (EGES)**

Agriculture et alimentation humaine

Nous précisons les principales caractéristiques des productions mondiales (Céréales 2400Mt ; Cultures sucrières, sucre 160Mt ; Oléagineux huile 100Mt) qui ont un contenu énergétique de l'ordre de 1000 Mtep, à comparer aux 9000 Mtep d'énergies fossiles. Les analyses portent sur :

- ▀ Les rendements par ha qui sont très dispersés selon les pays.
- ▀ La production céréalière mondiale qui suit la demande solvable et a cru de 60% en 30 ans sans accroissement notable des surfaces.
- ▀ Les écarts de productivité (quantité de céréales produite par actif agricole) qui étaient de 1 à 10 il y a un siècle sont aujourd'hui de 1 à 2000.
- ▀ Les prix du blé, en \$ constants, qui ont baissé d'un facteur 2 entre les années 60 et le début des années 2000.

Cette baisse de valeur des produits agricoles a des effets pervers comme celui de contribuer à appauvrir toutes les populations agricoles qui ne peuvent se mécaniser.

Nous montrons par ailleurs que la faim dans le monde n'est pas due à un déficit de production mondiale, mais est affaire de pauvreté et de régulation des prix de marchés. Les besoins d'aide alimentaire relevant de la solidarité internationale sont évalués.

D'ici 2050 les besoins pour l'alimentation, auront presque doublé. Il apparaît que la production agricole peut aussi doubler par augmentation des surfaces et des rendements moyens

Agriculture, coûts et potentialités énergétiques

Le contexte énergétique est discuté, mettant en évidence la forte dépendance des économies développées ou en développement, vis-à-vis des carburants liquides pour les transports, pour certains usages à caractère stratégique et notamment les productions agricoles. Disposer de carburants liquides provenant de leurs propres productions agricoles constitue pour les grands pays producteurs agricoles un atout majeur d'autonomie énergétique minimale.

La production agricole mobilise de l'énergie pour sa mécanisation et ses intrants

Cette énergie mobilisée par l'agriculture est évaluée au niveau mondial et représente 12 à 15 % du contenu énergétique de la récolte. *La plus grande partie de la production agricole mondiale a un besoin impératif de carburants liquides pour sa mécanisation et ses transports de collecte.*

La production d'agro-carburants mobilise de l'énergie pour la production agricole **mais aussi** pour la transformation des récoltes en agro-carburants. Les rendements énergétiques et en carburants liquides/ha sont évalués pour 3 filières : éthanol de Blé, éthanol de Betterave, diester Colza.

La concurrence entre agro-carburants et alimentation

Les prix assez bas des produits agricoles, la possibilité de les transformer en carburants à un coût également modeste, et le caractère éminemment stratégique des carburants liquides font qu'une concurrence entre productions agricoles à usage alimentaire et productions agricoles pour agro-carburants, devrait s'installer à nouveau dès que le prix du pétrole sera durablement à un niveau de 100 à 120\$ le baril. Cet état de fait renforce l'intérêt de développer l'autonomie alimentaire de toutes les nations ou groupes de nations de façon à rendre gérable cette concurrence. Cette concurrence pourrait être atténuée par une optimisation des filières de génération 1 et le développement des biocarburants de deuxième et troisième génération si celles-ci deviennent compétitives économiquement.

Agriculture et Emissions de Gaz à Effet de Serre

Les EGES liées à l'ensemble de la production agricole apparaissent actuellement relativement faibles (13% des EGES anthropiques au niveau mondial) et ne constituent pas un enjeu de première importance pour la réduction par 2 des EGES mondiaux. Il en est de même pour la réduction des EGES par la promotion des agro-carburants.

La projection à 2050 qui prévoit un doublement de la production agricole et une réduction par 2 des EGES globaux rend cependant intéressante et plus significative la limitation des EGES liées aux productions agricoles pour l'alimentation, et pour les agro-carburants.

Trois points sont discutés :

- ▀ L'utilisation d'énergies sans EGES pour la production des intrants et pour la transformation éventuelle de récoltes en agro-carburants.
- ▀ La réduction de la contribution du N₂O aux EGES de l'agriculture
- ▀ Le changement rationnel d'affectation des sols dont le bilan EGES est revisité : le changement peut être localement nécessaire pour renforcer l'autonomie alimentaire de certaines nations.

En conclusion

La route vers 2050 est périlleuse et difficile tant du point de vue de l'approvisionnement énergétique qui doit doubler alors qu'il faut diviser par deux les émissions mondiales de gaz à effet de serre, que du point de vue d'une production agricole qui doit elle aussi doubler pour nourrir 9 milliards d'êtres humains.

Dans ce contexte, il y a lieu de craindre l'occurrence de nouvelles périodes de concurrence frontale entre agro-carburants et usages alimentaires. Ces crises probables toucheront en premier lieu les pays les plus pauvres.

A cet égard, il apparaît qu'une plus large autonomie alimentaire des pays ou « groupes de pays » au sein d'une région pourrait rendre plus facile à gérer la priorité de l'alimentation humaine dans les mécanismes de solidarité internationale.

Enfin, un certain nombre d'axes de recherches ont été identifiés.



La place du Nucléaire en 2050

Ce travail a pu être réalisé grâce au programme Energie 2 du CNRS, dans le cadre du « Groupe d'Analyse Thématique « nucléaire du futur ». Il a pu être présenté, discuté, débattu et amélioré au long d'une série de séminaires organisés entre 2007 et 2009. Les auteurs du rapport tiennent donc à remercier les personnes suivantes, pour leur apport et l'enrichissement de ce travail : M. Aiche, G. Barreau, A. Bidaud, A. Bidaud, I. Billard, H. Doubre, L. Giot, A. Guertin, B. Haas, P. Hennequin, D. Heuer, B. Jurado, F.-R. Lecolley, J. Margueron, M. Pagel, G. Rudolf, J.-B. Saulnier, C. Simon, E. Simoni, J. Wilson.

A l'origine cette démarche a été entreprise pour tenter de déterminer quelle pourrait être la part de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique mondial d'ici 2050. Pour cela, il faut au préalable avoir une idée de la quantité totale d'énergie dont on devrait disposer raisonnablement en 2050 et pour combien d'individus. Mais ce n'est pas suffisant car la consommation d'énergie en 2050 ne ressemblera pas à celle d'aujourd'hui. Pour aborder ces questions de manière exhaustive et « oser » faire des prédictions, il faudrait intégrer un nombre de paramètres considérable, élaborer des modèles complexes et ce ne serait sans doute pas encore suffisant. Il ne s'agit donc pas ici de mener une étude précise et prédictive mais d'adopter une démarche plutôt intuitive et autant que possible étayée pour en dégager des informations et des tendances pertinentes à partir d'une représentation du monde économique et énergétique simplifiée, voire schématique, mais dont on maîtrise aisément les paramètres.

Résumé du rapport

L'étude présentée est le résultat d'une réflexion menée sur le paysage énergétique mondial de 2050. Il ne s'agit pas d'un travail de prospective, mais d'une construction du mix énergétique en 2050, basée sur des données et des hypothèses globales explicitées (consommation d'énergie, répartition mondiale, émission de CO₂).

Ce rapport a l'ambition de proposer une base de discussion solide et étayée. La démarche se veut donc simplifiée et transparente : chaque étape du cheminement est décrite dans sa totalité. Les résultats permettent de dégager des tendances pertinentes et d'apporter des informations quantitatives sur différents types de mix énergétiques en 2050 : au niveau mondial, par type de besoin (transport, industrie, résidentiel/tertiaire, électricité), par type de population, ou par zone géographique. Cette étude aboutit à une estimation de la demande d'énergie nucléaire en 2050, qui fait l'objet d'une description particulière.

Contexte énergétique et climatique

A l'échelle mondiale, les besoins en énergie sont actuellement couverts à 80 % par les combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon). Bien que leurs réserves soient très inégalement réparties dans le monde, ils sont massivement utilisés depuis plus de deux siècles pour satisfaire nos besoins en énergie car ils offrent des avantages qu'aucune autre source ne possède : ils ont une densité énergétique importante, ils sont stockables et transportables. Ils sont utilisables de manière flexible pour tous nos besoins (transport, chaleur à haute et basse température, électricité) et à toutes les échelles de production (de la chaudière individuelle aux centrales thermiques de grande puissance). Leur coût reste très compétitif et les technologies à mettre en œuvre pour leur utilisation sont maîtrisées. Mais il est désormais établi que

les émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques et principalement le CO₂ émis par l'usage des combustibles fossiles sont responsables du réchauffement climatique. A défaut de pouvoir l'enrayer, une réduction significative de la consommation mondiale d'énergie fossile dans les années à venir pourrait néanmoins limiter l'augmentation de la température moyenne de 2°C.

Par ailleurs, la consommation d'énergie dans le monde est très inégalement répartie. Bien que la population des pays riches actuels ne représente que 20 % de la population mondiale, elle consomme à elle seule plus de la moitié de l'énergie totale produite. Cependant, l'essor économique de certains pays émergents, tels la Chine et l'Inde, permet d'ores et déjà à une partie de leur population d'améliorer considérablement leur niveau de vie et se traduit par une augmentation importante de leur consommation d'énergie. Il n'en reste pas moins qu'une part importante de la population mondiale, en majorité celle des pays pauvres et émergents, et plus particulièrement les ruraux, présente un niveau de consommation extrêmement bas. Dans les années à venir, la population des pays riches actuels n'augmentera que très peu tandis que celle des pays émergents et pauvres ne va cesser de croître jusqu'en 2050 au moins. Ces derniers sont donc amenés à dominer la demande énergétique mondiale.

D'ici 2050, le monde devra donc satisfaire les besoins énergétiques croissants de sa population en augmentation tout en diminuant son recours à l'énergie fossile dans la perspective de limiter son impact sur le réchauffement climatique. S'ajoute à cela la gestion de la pénurie des ressources en pétrole conventionnel et en gaz naturel annoncée avant 2050.

Cette présentation très succincte du contexte énergétique mondiale actuel et de son évolution montre que les sources d'énergie non émettrices de CO₂ devront être développées autant que l'utilisation des combustibles fossiles sera réduite et que la demande énergétique sera élevée. Le déploiement d'ici 2050 de ces sources est multiparamétrique : maturité industrielle, respect des contraintes environnementales (emprise au sol, pollutions, ...), coût lié aux investissements, au fonctionnement et au combustible, acceptabilité sociale (nucléaire, éolien, séquestration du CO₂, ...). Malgré un développement soutenu des sources dites renouvelables (hydraulique, biomasse, solaire, éolien, géothermie), il faudra compter sur le charbon « propre », c'est-à-dire la mise en œuvre du captage et de la séquestration du CO₂ émis par les centrales thermiques utilisant du gaz et du charbon. Mais ce ne sera sans doute pas suffisant et le recours à l'énergie nucléaire peut s'avérer incontournable. Estimer sa part dans le mix énergétique mondial en 2050 est complexe puisqu'elle dépend de la demande globale d'énergie, de la réduction de la consommation d'énergie fossile, du potentiel technico-économique des sources renouvelables et de la quantité totale de CO₂ que nous serons capables de séquestrer chaque année. Enfin, si l'ensemble de ces sources permet de répondre à la demande énergétique mondiale globale en 2050, toutes ne sont pas à même de satisfaire nos besoins en chaleur, en électricité et pour le transport. Il subsiste donc la question de leur adéquation à nos différents types de besoins (chaleur haute ou basse température, transport, électricité, ...).

Les hypothèses

L'étude que nous proposons consiste à construire une représentation de la demande énergétique mondiale en 2050 en prenant en compte de manière simple mais réaliste l'ensemble des paramètres dont elle dépend : population, consommation, contrainte climatique et potentiels des sources d'énergie disponibles. Le but de cette étude n'est pas de prédire l'évolution de ces paramètres de nos jours à 2050, mais de choisir comme hypothèses initiales leurs valeurs en 2050 et de décrire le monde énergétique qui en résulte. Les hypothèses initiales retenues pour notre étude sont les suivantes :

- une population mondiale en 2050, $P_{\text{total}}^{\text{Monde}} \sim 9$ milliards d'habitant (Ghab) (6,5 Ghab en 2006) ;
- une consommation énergétique mondiale en 2050, $E_{\text{total}}^{\text{Monde}} = 20$ Gtep/an (~ 11 Gtep/an en 2006), qui nous paraît être une moyenne « sobre » des différentes études de perspectives ;
- une réduction d'un facteur 2 d'ici 2050 des émissions de CO₂ liées à la production d'énergie, ce qui fixe une consommation d'énergie fossile en 2050 à $F_{\text{total}}^{\text{Monde}} = 4,2$ Gtep/an (~ 9 Gtep/an en 2006).

La répartition de la consommation énergétique

Notre démarche pour bâtir le mix énergétique mondial en 2050 à partir de ces hypothèses et notamment pour estimer la part de l'énergie nucléaire dans la consommation mondiale d'énergie, comporte plusieurs étapes que nous allons décrire successivement mais elle repose avant tout sur une approche particulière qu'il est important de définir. En effet, le contexte énergétique mondial peut être abordé de plusieurs

manières, la plus simple mais sans doute la plus réductrice est de se représenter le monde en huit grandes régions géographiques (Amérique du Nord, Pacifique, Ex-URSS, Europe, Moyen-Orient, Amérique Latine, Asie, Afrique), d'attribuer à chacune d'elle une consommation d'énergie moyenne par habitant et de les classer en conséquence dans l'une des trois catégories de développement économique : riche, émergent ou pauvre. Cette représentation n'est pas adaptée pour décrire la situation actuelle et future des pays émergents dans lesquels, il existe déjà de grandes disparités de consommation d'énergie entre les habitants de leur population. Aussi, à l'exception des populations des pays riches actuels (Amérique du Nord, Pacifique, Ex-URSS, Europe) qui maintiendront un niveau de consommation d'énergie globalement élevé en 2050, nous supposons qu'au sein de chacune des autres grandes régions du monde les inégalités persisteront et qu'une description plus réaliste de leur consommation d'énergie consiste à répartir leur population totale selon trois groupes P_1 , P_2 et P_3 , correspondant à trois niveaux de consommation, élevé, modéré et faible, C_1 , C_2 et C_3 . Cette approche implique que ces trois niveaux de consommation d'énergie seront les mêmes partout de par le monde.

Compte tenu de l'essor économique que connaissent aujourd'hui la Chine et l'Inde, et de leurs populations qui en 2050 représenteront à elles seules environ un tiers de la population mondiale, ces deux pays ont été traités à part du continent asiatique. De la même façon, une distinction est faite entre l'Afrique du Nord, l'Afrique du Sud et l'Afrique sub-saharienne qui présentent des consommations d'énergie par habitant très disparates. Ainsi des huit grandes régions géographiques initiales, nous avons divisé le monde en douze entités économiques.

Pour chacune d'elle, la répartition de la population en 2050 dans les groupe P_1 , P_2 et P_3 est basée conjointement sur l'état de développement actuel et sur le taux d'urbanisation en 2050 (voir figure ci-dessous).

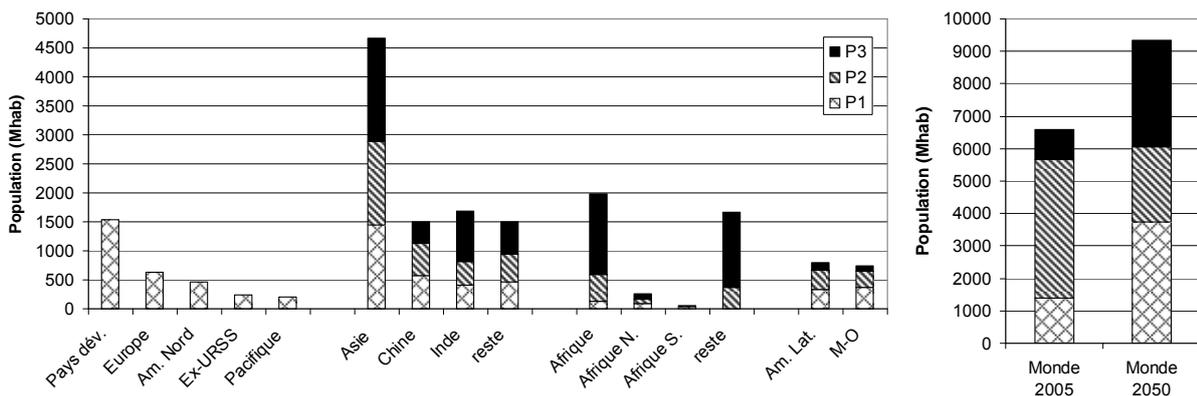


Figure 1 : répartition des groupes de population, P_1 , P_2 et P_3 (millions d'habitants) en 2050 dans le monde et dans chacune des 12 entités économiques choisies.

Enfin, les trois niveaux de consommation d'énergie par habitant, C_1 , C_2 et C_3 , obéissent à la simple loi de somme :

$$\left(\sum_{\text{Monde}} P_1 \right) C_1 + \left(\sum_{\text{Monde}} P_2 \right) C_2 + \left(\sum_{\text{Monde}} P_3 \right) C_3 = E_{\text{total}}^{\text{Monde}} \Leftrightarrow \left[\left(\sum_{\text{Monde}} P_1 \right) \frac{C_1}{C_3} + \left(\sum_{\text{Monde}} P_2 \right) \frac{C_2}{C_3} + \left(\sum_{\text{Monde}} P_3 \right) \right] C_3 = E_{\text{total}}^{\text{Monde}}$$

A partir de cette relation, la première étape de notre analyse consiste à quantifier les trois niveaux de consommation d'énergie, élevé, modéré et faible, selon une « clé d'inégalité » $\frac{C_1}{C_3} / \frac{C_2}{C_3} / \frac{C_3}{C_3}$ choisie en

2050 et contraint par une consommation mondiale de 20 Gtep/an.

Convaincus qu'un accès à l'énergie partagé et plus équitable au niveau mondial ainsi qu'une volonté commune de ne pas amplifier d'avantage le dérèglement climatique sont sans doute des conditions nécessaires pour construire un monde futur plus juste et pacifié, nous avons opté pour une réduction de plus d'un facteur 2 des inégalités entre les niveaux C_1 et C_3 par rapport à la situation actuelle. La clé d'inégalité choisie est donc $4 / 2 / 1$, ce qui conduit, dans un scénario « 20 Gtep/an », aux valeurs suivantes : $C_1 = 3,5$ tep/hab/an, $C_2 = 1,75$ tep/hab/an et $C_3 = 0,87$ tep/hab/an.

Une volonté de réduire les inégalités de la consommation mondiale d'énergie tout en améliorant le niveau d'une part importante de la population des pays pauvres et émergents actuels exige des populations les plus

riches de diminuer leur consommation en 2050 de manière significative (voir figure 2). Dans un scénario « 20 Gtep/an », cette diminution est en moyenne de 27 %. Cette contrainte est d'autant plus forte que la tendance actuelle indique une augmentation continue de la consommation d'énergie par habitant des populations les plus favorisées.

Quant aux populations les plus pauvres, leur consommation par habitant augmente de 75%, mais n'atteint pas encore 1 tep/hab/an en 2050, ce qui peut sembler encore insuffisant.

La contrainte sur les émissions de CO2

Dans une seconde étape, nous nous sommes attachés à évaluer les répercussions d'une consommation de combustibles fossiles fixée à 4,2 Gtep/an sur la demande énergétique mondiale en 2050. Comme précédemment, une clé d'inégalité portant cette fois sur l'utilisation de l'énergie fossile,

$\frac{F_1}{F_3} / \frac{F_2}{F_3} / \frac{F_3}{F_3}$, permet d'allouer à chaque catégorie de population, P_1 , P_2 et P_3 , la quantité de combustibles

fossiles qu'elle pourra utiliser c'est-à-dire avec émission de

$$CO_2 : \left[\left(\sum_{\text{Monde}} P_1 \right) \frac{F_1}{F_3} + \left(\sum_{\text{Monde}} P_2 \right) \frac{F_2}{F_3} + \left(\sum_{\text{Monde}} P_3 \right) \right] F_3 = F_{\text{total}}^{\text{Monde}} .$$

Nous considérons que les populations riches seront les plus à même de développer des nouvelles sources d'énergie, plus coûteuses et plus contraignantes que les combustibles fossiles. Ainsi, nous fixons une clé d'inégalité pour la consommation d'énergie fossile avec émission de CO₂ plus drastique que pour la consommation d'énergie, soit 2 / 1,4 / 1 en 2050, contre 13 / 2 / 1 actuellement. On obtient ainsi les valeurs suivantes :

$F_1 = 0,6$ tep/hab/an, $F_2 = 0,42$ tep/hab/an et $F_3 = 0,3$ tep/hab/an.

Une volonté de limiter d'un facteur 2 les émissions de CO₂ au niveau mondial conduit à des efforts drastiques de la part de la quasi-totalité des 12 entités économiques (voir figure 2). Les pays riches actuels devront mettre en œuvre des sources d'énergie alternatives aux combustibles fossiles, c'est-à-dire non émettrices de CO₂, pour couvrir environ 85 % de leurs besoins. Les pays en voie de développement devront limiter l'utilisation de l'énergie fossile et assurer l'augmentation de leur consommation avec des sources alternatives. A nouveau, cette contrainte climatique est d'autant plus forte que la tendance actuelle montre une consommation de combustibles fossiles en augmentation.

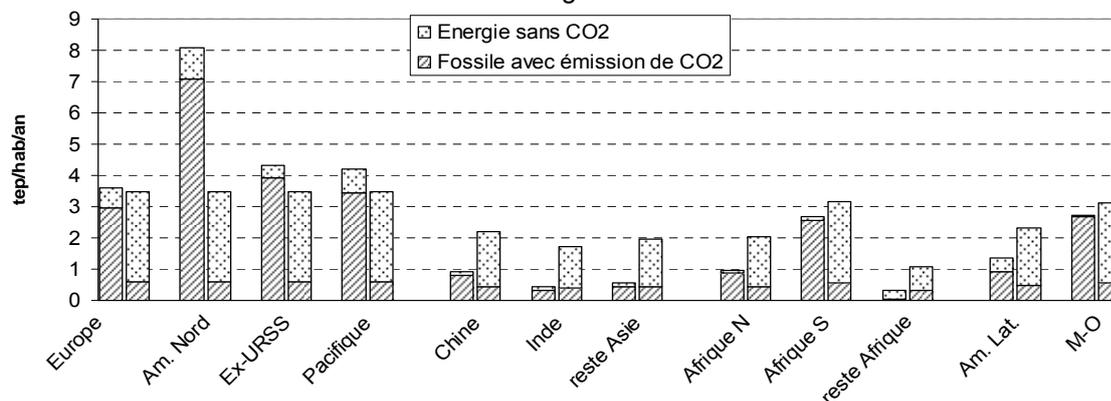


Figure 2 : pour chacune des 12 entités économique : la barre de gauche montre la consommation d'énergie moyenne par habitant (tep/hab/an) en 2005 ainsi que la part des combustibles fossiles avec émission de CO₂, la barre de droite montre les résultats obtenus pour 2050 compte tenu des clés d'inégalité choisies pour la consommation d'énergie et les émissions de CO₂.

Ces premiers résultats montrent de manière évidente que la façon dont on produit l'énergie devra radicalement changer d'ici 2050. Nous nous intéressons aux différents types d'utilisation de l'énergie, et donc de l'adéquation des sources et des besoins.

Construction du mix énergétique

La troisième étape, nécessaire à la construction du mix énergétique en 2050, porte sur la répartition des sources d'énergie disponibles en 2050 dans les différents secteurs de consommation : transport, industrie,

résidentiel/tertiaire et électricité. Pour chaque catégorie de population P_1 , P_2 et P_3 , l'attribution de la fraction de leur énergie totale consommée par secteur correspond à celle des pays riches, émergents et pauvres actuels, respectivement. On aboutit ainsi à une demande d'énergie en 2050 réparties selon le type de besoin : 5 Gtep/an pour les transports, 4 Gtep/an de chaleur à haute température pour l'industrie, 4 Gtep/an de chaleur à basse température pour le résidentiel/tertiaire et 7 Gtep/an pour les usages électriques.

Cette étude n'étant pas une étude de prospective, mais une tentative de description du monde énergétique qui répond à la contrainte climatique, le coût de chaque énergie n'est pas un critère de sélection. Ce critère est néanmoins présent indirectement, dans l'estimation du potentiel des différentes sources d'énergie.

Notre démarche a consisté à considérer en premier lieu l'énergie fossile avec émission de CO_2 et les énergies renouvelables. Le potentiel de l'ensemble des sources renouvelables retenu pour cette étude est d'environ 8 Gtep/an dont la moitié peut subvenir aux transports (biocarburants) et aux besoins en chaleur (biomasse, solaire thermique et à concentration, géothermie), l'autre moitié étant exclusivement réservée à la production d'électricité (hydraulique, solaire photovoltaïque et thermodynamique, éolien).

Nous avons réservé la majeure partie des combustibles fossiles avec émission de CO_2 au transport (70 %), du fait du potentiel estimé des biocarburants (~ 0,5 Gtep/an), de l'impossibilité à capter le CO_2 et de la difficulté à stocker l'électricité. Au final 30 % des transports sont assurés par l'électricité, ce qui semble compatible avec les transports urbains.

Le potentiel des énergies renouvelables dédiées à la production de chaleur est estimé à 3,2 Gtep/an, ce qui est inférieur aux besoins en chaleur qui s'élèvent à 8 Gtep/an au total. Ce premier constat met en évidence un problème d'adéquation entre les sources alternatives aux combustibles fossiles et nos besoins, notamment en chaleur. Pour éviter de reporter le déficit de chaleur sur l'électricité, il apparaît indispensable de développer la cogénération pour les centrales électriques utilisant les combustibles fossiles avec captage et séquestration du CO_2 , ainsi que l'énergie nucléaire dédiée uniquement à la production de chaleur. Néanmoins, l'éloignement de la production de chaleur aux sites industriels et la construction de réseaux performants pour approvisionner les habitations en chaleur limitent l'utilisation de la cogénération avec séquestration du CO_2 et de la chaleur nucléaire.

Lorsque l'on attribue successivement à chaque secteur, hors électricité, la part des combustibles fossiles avec émissions de CO_2 (4,2 Gtep/an), la chaleur produite par les sources renouvelables au maximum de leur potentiel estimé (~ 3,2 Gtep/an) puis celle issue de la cogénération (~ 2 Gtep/an) et du nucléaire (~ 0,5 Gtep/an), et enfin la part des biocarburants au transport (~ 0,5 Gtep/an), les besoins ne sont toujours pas intégralement couverts.

Le report sur l'électricité est effectué de façon optimale, notamment en prenant en compte l'utilisation de pompes à chaleur pour la production de chaleur, qui permet de diviser par 3 environ la consommation électrique pour un besoin donné. Une fois ce report effectué pour le transport, le résidentiel/tertiaire et l'industrie, la consommation électrique totale en 2050 s'élèvent à 11,5 Gtep/an et représente plus de la moitié de l'énergie mondiale. A nouveau, ces besoins sont supérieurs au potentiel des sources d'énergie renouvelables dédiées à la production électrique (4 Gtep/an).

Au final, le charbon « propre » et le nucléaire devront donc produire environ 6 Gtep/an d'électricité. A l'heure actuelle, les capacités du stockage du CO_2 sont incertaines, nous les avons estimées en 2050 à 12 Gt/an ce qui correspond à 3,5 Gtep/an de combustibles fossiles (en incluant la cogénération déjà évoquée). La part du nucléaire dans le mix énergétique mondiale en 2050 représente alors un peu moins de 5 Gtep/an, production de chaleur incluse, soit un facteur 8 par rapport à la production actuelle.

Dans notre représentation du monde énergétique en 2050, la totalité des besoins sont couverts en part à peu près égale par l'énergie fossile avec émission CO_2 , le charbon « propre », les sources renouvelables productrices de chaleur, les sources renouvelables productrices d'électricité, et l'énergie nucléaire. Leur répartition dans chaque secteur de consommation ainsi que le report sur l'électricité des besoins pour le transport, l'industrie et le résidentiel/tertiaire sont résumés dans la figure suivante.

* Le principe de la cogénération est de produire l'électricité tout en récupérant la chaleur rejetée par les centrales thermiques à plus ou moins haute température pour des usages industriels ou pour le résidentiel/tertiaire.

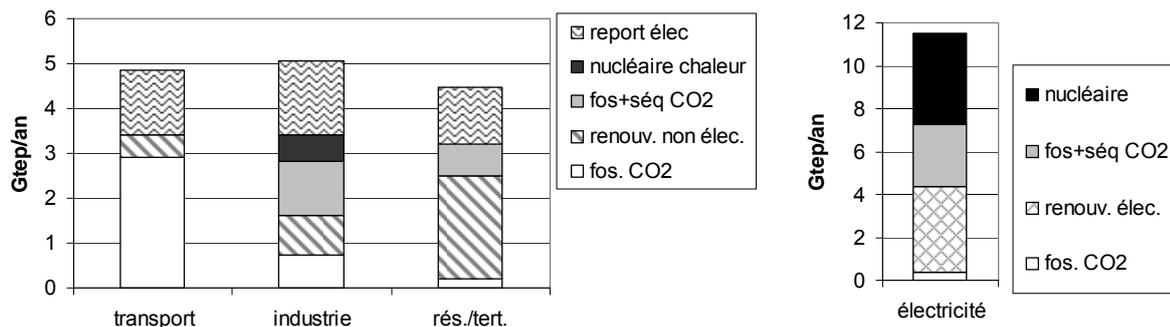


Figure 3 : pour chaque secteur, part des différents types de sources : combustibles fossiles avec émission de CO₂, renouvelables non électriques (biocarburant pour les transports, et production de chaleur pour l'industrie et le résidentiel/tertiaire), les combustibles fossiles avec séquestration de CO₂ et le nucléaire, ainsi que les reports sur l'électricité des besoins pour les transports, l'industrie et le résidentiel/tertiaire.

Ces sources ont été réparties entre les différents secteurs et pour chaque type de population P₁, P₂ et P₃. La répartition des sources entre les types de population a été effectuée au prorata de leurs besoins ou en tenant compte de certaines tendances fortes actuelles : l'utilisation de la biomasse traditionnelle est concentrée sur la population P₃, et le nucléaire est envisagé uniquement pour les populations P₁ et P₂.

Ainsi, connaissant la contribution des populations P₁, P₂ et P₃, à la population totale de chaque entité économique, on obtient le mix énergétique de chacune d'elle en 2050 (voir figure 4) et plus particulièrement la part de l'énergie nucléaire.

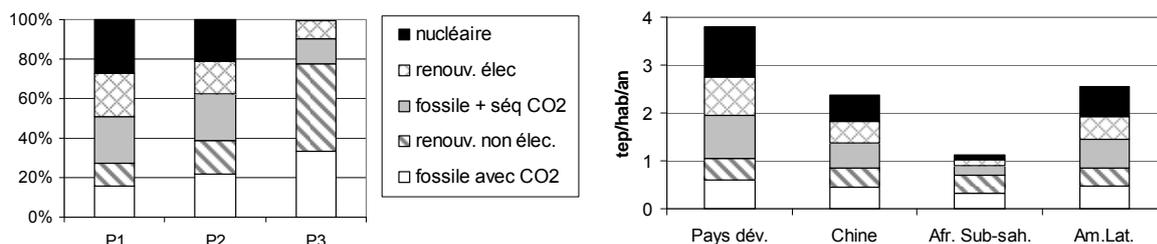


Figure 4 : Mix énergétique pour les trois types de population P₁, P₂ et P₃ et pour quelques régions clés.

A l'exception de l'Afrique sub-saharienne, on observe un nivellement des émissions de CO₂ par habitant de l'ordre de 1,7 tonnes/an pour toutes les entités. Aucune ne pourra échapper au développement de la technologie de la séquestration et du stockage du CO₂, le recours au charbon « propre » étant uniformément utilisé dans le monde à hauteur d'environ 20 %. De même, toutes les entités devront compter sur les sources d'énergie renouvelables productrices de chaleur dans des proportions variant de 10 % pour les pays occidentaux jusqu'à 40 % pour l'Afrique sub-saharienne dont la consommation repose déjà en grande partie sur la biomasse.

Enfin, le déploiement d'un facteur 8 de l'énergie nucléaire en 2050 (soit ~ 1750 réacteurs de type EPR de puissance 1,65 GW_{élec}) ne sera pas homogène dans le monde puisque sa production sera essentiellement concentrée en Asie (~ 2 Gtep/an) et dans les pays occidentaux (~ 1,6 Gtep/an). Il est donc fort probable que les choix énergétiques futurs que feront la Chine et l'Inde, qui maîtrisent déjà la technologie nucléaire, auront des répercussions sur le mix énergétique mondial. Ceci reflète également le difficile accès à l'énergie nucléaire car sa technologie est complexe et contraignante, notamment du point de vue de la sûreté. Sa production centralisée réclame aussi des réseaux électriques étendus et performants, ce qui peut limiter son déploiement dans certaines régions. Néanmoins, la production nucléaire ramenée au nombre d'habitants sera la plus importante dans les pays développés actuels avec environ 1 tep/hab/an, ce qui reste inférieure à la production française actuelle (1,45 tep/hab/an). Dans notre représentation, la part de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique des entités en 2050, à l'exception de l'Afrique sub-saharienne, est assez homogène puisqu'elle varie de 20 % à 25 %, contre 39 % actuellement en France.

En conclusion

La méthode proposée pour décrire la demande énergétique mondiale en 2050 repose sur des valeurs de paramètre et de choix d'hypothèses simples, argumentés et explicités. Elle permet d'apporter un éclairage quantitatif sur ce que peut être le monde énergétique en 2050 contraint par une production d'énergie donnée et soucieux d'endiguer le réchauffement climatique. Cette étude pourrait être poursuivie par une analyse plus détaillées de la sensibilité aux hypothèses de départ (consommation totale, émissions de GES, clés d'inégalités), afin d'avoir une vision lisible des différents scénarios énergétiques, en termes de consommation d'énergie par habitant et de mix énergétiques des grandes régions du monde. Cette méthodologie pourrait également servir de base à une inter-comparaison de scénarios énergétiques produits par différentes institutions ou instituts de prospectives, nationaux ou internationaux.



Programme Interdisciplinaire

ENERGIE du CNRS



Direction : Jean-Bernard SAULNIER
LET - ENSMA
1 rue Clément Ader - Téléport 2 - BP 40109
86961 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL
☎ : 05 49 49 81 10 - Télécopie : 05 49 49 81 01
e-mail : jean-bernard.saulnier@cnrs-dir.fr - jean-bernard.saulnier@let.ensma.fr

Secrétariat : Romie LOPEZ
PROMES - CNRS
Rambla de la Thermodynamique - Tecnosud - 66100 Perpignan
☎ : 04 68 55 68 55 - Télécopie : 04 68 55 68 69 - e-mail : carnot@univ-perp.fr

<http://energie.cnrs.fr>