

DOSSIERS SPECIAUX ARCHIVES



Techniques de l'Ingénieur

ARCHIVES 2006

Spécial Programme interdisciplinaire
énergie du CNRS

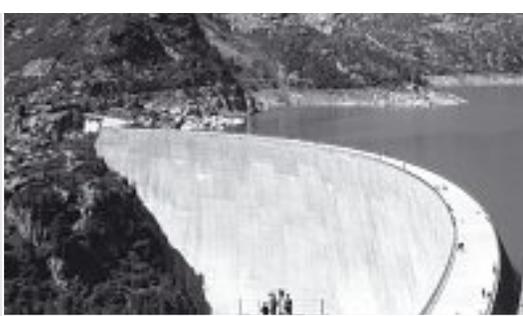
- Le CNRS acteur de l'Innovation en énergie
- Développement des procédés thermochimiques pour la production de froid par capteurs solaires plans
- Fluides frigoporteurs diphasiques : moins d'impact sur l'environnement
- Semi-conducteurs organiques : une voie alternative pour la conversion photovoltaïque ?
- Techpol, un observatoire des nouvelles technologies de l'énergie
- La fission du futur : scénarios
- Energie des vagues



Techniques
de l'Ingénieur

Septembre-Octobre 2006

Numéro **2** 17 €



La lettre

Techniques de l'Ingénieur

Energies



SPÉCIAL PROGRAMME INTERDISCIPLINAIRE ÉNERGIE DU CNRS

sommaire

Le CNRS acteur de l'innovation en énergie

Monique Lallemand → page 1

Développement de procédés thermochimiques pour la production de froid par capteurs solaires plans

Driss Stitou → page 2

Fluides frigoporteurs diphasiques : moins d'impact sur l'environnement

André Lallemand → page 3

Semi-conducteurs organiques : une voie alternative pour la conversion photovoltaïque ?

Corinne Alonso, Harald Bock, Pierre Destruel, Bruno Estibals, Jean-François Nierengarten, Isabelle Séguy → page 4

TECHPOL, un observatoire des nouvelles technologies de l'énergie

Philippe Menanteau → page 5

La fission au futur : scénarios

Sylvain David, Jean-Marie Loiseaux → page 6

Énergie des vagues

Alain H. Clément → page 7

Actualité de notre partenaire → page 8

notre partenaire



Le CNRS acteur de l'innovation en énergie

Contexte énergétique mondial. La maîtrise de la demande future d'énergie et des conditions d'approvisionnement constitue un enjeu politique majeur pour l'ensemble de la planète. Elle est rendue d'autant plus difficile que l'humanité doit faire face à un double défi : celui de la satisfaction des besoins énergétiques d'une population mondiale qui croîtra encore au cours des prochaines décennies et dont une large part aspire à un développement économique et social fondé sur une demande accrue d'énergie, et celui posé par la nécessaire diminution des émissions des gaz à effet de serre, inhérentes à l'utilisation des combustibles fossiles, et des émissions d'autres gaz polluants, qui menacent les équilibres climatiques et environnementaux de la Terre.

Implication du CNRS. C'est donc dans le cadre de la problématique de l'environnement, mais aussi du développement durable, que les défis énergétiques doivent être relevés. Afin de répondre à la demande énergétique des prochaines années, le CNRS a engagé dès 2001 une vaste réflexion avec de nombreux organismes de recherche, le ministère chargé de la recherche et des industriels. Ces réflexions ont donné naissance au programme interdisciplinaire *ÉNERGIE* mis en place en avril 2002.

Les thématiques. Les orientations du programme *ÉNERGIE* sont articulées autour du nécessaire développement de nouvelles ressources énergétiques (solaire, biomasse, éolien, géothermie, nucléaire du futur), sur la maîtrise des vecteurs énergétiques (électricité, chaleur, hydrogène), sur le développement de procédés propres et respectant l'environnement (combustion, piles à combustible, habitat, procédés industriels, etc.). Les mesures visant à accroître l'acceptabilité environnementale des moyens de production et la validation socio-économique des nouvelles sources, tout en accordant aux nouvelles technologies le temps nécessaire à leur maturation, complètent la stratégie de recherche du programme.

Les modes d'action du programme. Trois modes d'action ont été mis en place pour créer une communauté Énergie. Tout d'abord, des groupes d'analyse thématique, relatifs aux thématiques citées ci-dessus, ont permis de rapprocher des compétences interdisciplinaires de chercheurs en vue d'atteindre les buts que se fixe le programme, d'organiser les échanges et les collaborations avec les ministères, d'autres organismes de recherche, les acteurs du monde socio-économique et les industriels, de mener les études prospectives nécessaires et de hiérarchiser les verrous à lever. Parallèlement, des Projets de Recherche Intégrée (PRI), impliquant

1



Vers un mix énergétique.

3 à 5 équipes de recherche pendant une période de deux à trois ans, avec un ou plusieurs industriels impliqués ont été mis en place. Enfin, des projets exploratoires ont permis de caractériser l'intérêt et l'opportunité de développer des sujets innovants.

Quelques résultats en chiffres. Le programme, qui a reçu le soutien du Ministère délégué à l'Enseignement supérieur et à la Recherche (MESR) et de la Délégation Générale de l'Armement (DGA), a mobilisé de l'ordre de 1 000 chercheurs et enseignants-chercheurs et a permis la réalisation de 65 projets. Pour les projets terminés en 2004, la production scientifique se traduit par 81 articles, 131 communications en congrès et 8 brevets. Un colloque annuel, qui permet de suivre les avancées des travaux, de l'ordre de 20 séminaires spécifiques annuels, plusieurs écoles de formation, un livre blanc (2003, consultable sur le site du programme), des rapports de projets, une plaquette de la série des "CNRS focus", une contribution au rapport de conjoncture 2004 du CNRS, une participation

d'experts du CNRS auprès de l'Office parlementaire de l'évaluation des choix scientifiques et technologiques constituent autant de travaux effectués au sein du programme. Quelques exemples de PRI sont donnés dans cette Lettre.

Des retombées. L'effet structurant du programme, qui se traduit par une véritable mise en œuvre multidisciplinaire, a permis à de nombreuses équipes ainsi constituées de poursuivre leurs travaux au sein des appels à projets de l'Agence nationale de la recherche (ANR) ; elles se trouvent désormais en bonne position pour participer aux futurs appels à projets du 7^e Programme Cadre Européen de Recherche, de Développement Technologique et de Démonstration (PCRDT).

Monique Lallemand

Directrice du programme ÉNERGIE du CNRS

Pour en savoir plus : energie.insa-lyon.fr

PRODUCTION ET DISTRIBUTION DE FROID

Développement de procédés thermochimiques pour la production de froid par capteurs solaires plans

L'essor économique des pays en voie de développement, soumis dans leur majorité à des climats chauds, va entraîner une demande croissante des besoins en froid pour la conservation de denrées, de vaccins et le confort dans l'habitat. La production de froid apparaît donc comme un nouvel enjeu énergétique majeur de ce nouveau siècle.

2

Contexte. Les solutions actuelles de production de froid reposent essentiellement sur des technologies à compresseur, grands consommateurs d'énergie électrique. Il convient alors de rechercher de nouvelles solutions technologiques utilisant les énergies renouvelables afin de réduire la consommation d'énergie fossile et les émissions de gaz à effet de serre.

La production de froid solaire par sorption solide/gaz. Le principe

repose sur la gestion de deux processus physico-chimiques renversables couplés : une évaporation/condensation d'un fluide et un processus d'absorption/désorption du gaz par un réactif solide. Ces processus sont mis en œuvre dans deux enceintes en communication constituant alors un dipôle thermo-chimique. Le sel réactif utilisé est le chlorure de baryum qui réagit avec l'ammoniac. Le fonctionnement du dipôle est discontinu (fonctionnement

jour/nuit). Pendant la première phase (jour) le solide réactif contenu dans le réacteur est chauffé directement par le soleil permettant alors la réaction de décomposition du sel. Le gaz libéré par cette réaction se condense à la température ambiante dans le condenseur et est accumulé dans l'évaporateur. Durant la seconde étape (nuit), le réacteur se refroidissant à la température ambiante permet de réabsorber le gaz réfrigérant. Cette réabsorption provoque l'évapora-

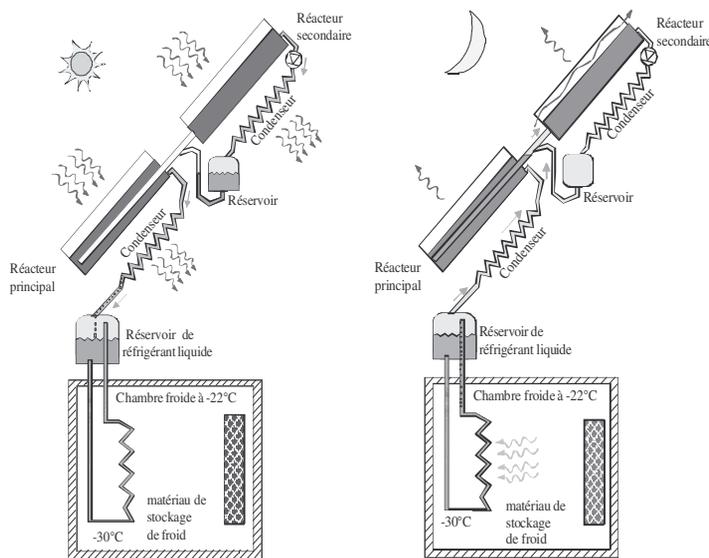


Figure 1. Schémas de principe et pilote expérimental du procédé de congélation solaire. © PROMES

tion du fluide frigorigène dans l'évaporateur produisant ainsi le froid. Un procédé de base utilisant un seul dipôle, couplé à des capteurs solaires plans classiques délivrant de la chaleur à 70°C permet ainsi une production frigorifique spécifique de l'ordre de 1 à 1,2 kWh froid/m² capteur à 0°C.

La congélation solaire. Ce principe peut tout aussi être étendu à des applications de congélation solaire. Un tel concept a été développé au laboratoire PROMES¹ dans le cadre du programme ÉNERGIE du CNRS et repose sur un système de production de froid en cascade. L'originalité du procédé réside dans le couplage thermique de deux dipôles thermochimiques (primaire et secondaire) pendant la phase productive afin d'atteindre la température de froid visée : un dipôle primaire permet la production de froid au sein de la chambre froide tandis qu'un dipôle secondaire assure le refroidissement du réacteur du dipôle primaire au cours de la nuit. En phase de jour, les dipôles

sont tous deux en phase de régénération et sont découplés thermiquement. Ce nouveau concept qui a fait l'objet de deux dépôts de brevet² permet d'atteindre des températures de production de froid jusqu'à -45°C uniquement grâce à des capteurs solaires plans classiquement utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire. Un pilote représentatif (production journalière de 1 200 Wh de froid à -25°C) a été réalisé afin de démontrer la faisabilité d'un tel concept (Fig. 1). Son originalité réside dans son fonctionnement totalement autonome et auto-adaptatif : il ne comporte aucun organe de commande et est entièrement contrôlé par les conditions extérieures (ensoleillement et température extérieure). Les résultats expérimentaux ont ainsi montré d'excellentes performances énergétiques du pilote en regard des technologies solaires concurrentes. Le pilote a atteint des températures de -32°C pour des températures du capteur solaire de 80°C. Le coefficient de performance (COP) du système

expérimenté est de l'ordre de 13 % et en tenant compte du rendement des capteurs, le COP par rapport à l'énergie solaire incidente (SCOP) est de 6 %.

Conclusions. Il existe actuellement peu de procédés permettant d'obtenir une production de froid utile à partir d'une source chaude à bas niveau de température (70°C). Le champs d'application du procédé thermochimique couplé à des capteurs solaires plans, est vaste et nombreuses sont les possibilités de retombées économiques. L'intérêt de ce concept est qu'il permet de valoriser l'énergie solaire tout au long de l'année en combinant la fonction de chauffage solaire à celle de climatisation et/ou de réfrigération/congélation solaire, contribuant ainsi à une diminution de la consommation d'énergie fossile et de production de gaz à effet de serre.

Driss Stitou
PROMES/CNRS

1. Laboratoire Procédé, Matériaux et Énergie Solaire, UPR 8521, CNRS, Perpignan
2. Brevets WO2006048552 - WO2006/048558

Fluides frigoporteurs diphasiques : moins d'impact sur l'environnement

Comme beaucoup d'autres secteurs, l'industrie du froid se trouve confrontée à la problématique environnementale. Parmi les solutions envisagées pour réduire l'impact des fluides frigorigènes à effet de serre, celle du confinement des machines frigorifiques couplé à une distribution du froid par des fluides frigoporteurs diphasiques (FFD) apparaît comme étant performante.

La distribution du froid et les FFD.

Le confinement des machines et la distribution du froid par un fluide frigoporteur n'est pas une nouveauté. Il existe depuis fort longtemps des systèmes utilisant la distribution du froid par fluide monophasique. Le transfert d'énergie se fait alors par chaleur sensible. L'intérêt des FFD réside dans l'ajout d'une chaleur latente qui permet de véhiculer des puissances thermiques nettement supérieures. Les applications actuelles ou potentielles de ces fluides sont dans les secteurs de la grande distribution, de l'entreposage, du conditionnement d'air au moyen de réseaux de tailles diverses, du refroidissement et de la congélation par immersion, etc.

Les principaux types de FFD. Tout fluide à changement de phase ou contenant un matériau à changement de phase (MCP) dans la gamme de températures opérationnelle est potentiellement un FFD. Le changement de phase peut être soit liquide-vapeur, soit solide-liquide. Le seul cas d'application de FFD liquide-vapeur concerne le CO₂. Le problème essentiel de ce fluide réside dans l'écart entre son volume massique sous formes vapeur et liquide (rapport de 10 à 30 selon le niveau de température). Les

FFD solide-liquide n'ont pas le même inconvénient. En revanche pour être véhiculé, le milieu doit toujours conserver une partie liquide relativement importante, la part à changement de phase étant de l'ordre de 35 % au maximum. On dénombre cinq grands types de tels FFD :

- les solutions aqueuses de composés organiques ou inorganiques. Dans ce cas, le MCP est l'eau qui forme des cristaux de glace en suspension dans le reste de la solution aqueuse. On parle de "coulis de glace" ou "ice slurry" ;
- les émulsions constituées d'un MCP isolé du liquide de transport par un tensioactif ;
- les MCP microcapsulés transportés par un liquide ;
- les particules de gels à base de polymères et de MCP, entraînées par un liquide non miscible ;
- les hydrates de gaz.

La recherche et les FFD. Si les premières études datent de plus de 20 ans, la grande majorité des publications a moins d'une dizaine d'années. Au cours des cinq dernières années, on dénombre plus d'une centaine de publications sur ce sujet. Elles émanent d'une cinquantaine de laboratoires de

divers pays. Un groupe permanent de l'Institut international du Froid, constitué de près d'une centaine de personnes, organise périodiquement des ateliers de travail pour faire avancer les connaissances sur cette thématique.

Le programme ÉNERGIE du CNRS et les FFD.

Au milieu des années 1990, le LMSC¹ a breveté un gel aqueux de polymère utilisable dans des stockages de froid. Parallèlement, le CETHIL², puis l'URGPAN³ étudiaient les propriétés et le comportement des coulis de glace. En 2002, en réponse à l'appel d'offre du programme interdisciplinaire ÉNERGIE du CNRS, ces entités, rejointes par le GRETh⁴ et le LaTEP⁵ qui travaillaient également à la connaissance du comportement des FFD, ont proposé d'étudier un nouveau FFD : le coulis de glace stabilisée qui est, jusqu'à présent, le seul représentant du type 4 des FFD.

Un FFD à base de gel aqueux. Les recherches concernent les propriétés thermophysiques et de transferts des fluides, les matériaux, les méthodes de réalisation du changement de phase, l'étude du stockage, la modélisation et les mesures, notamment celle de l'état enthalpique du fluide. Les travaux

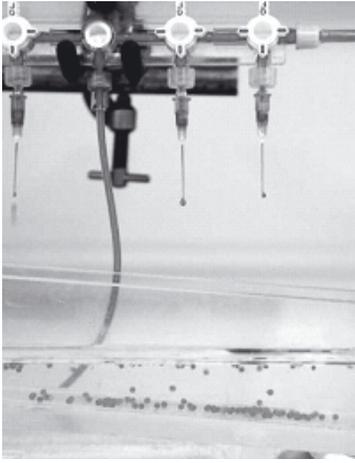


Figure 1. Réalisation, au laboratoire, de billes de gel aqueux. (© LMSC).

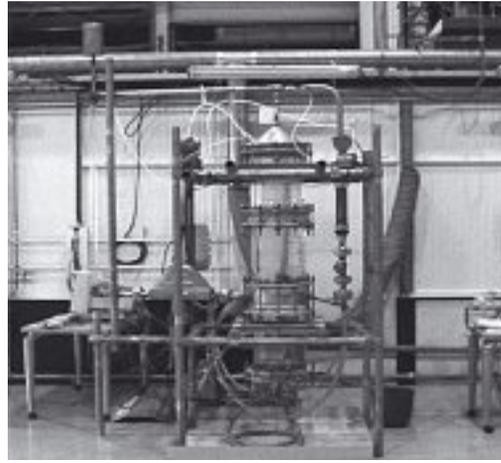


Figure 2. Installation d'étude de l'écoulement du coulis de glace stabilisée. (© GRETh).

réalisés ont concerné la mise au point du produit à l'échelle du laboratoire (Fig. 1), sa caractérisation thermodynamique, l'étude de son comportement en écoulement (Fig. 2) et lors des transferts thermiques ainsi que la mise au point d'une méthode de mesure de l'état du coulis. Le MCP est l'eau, le liquide porteur est une huile silicone de très faible viscosité et bonnes propriétés de transferts. Les particules de gel, de taille millimétrique, contiennent environ 90 % d'eau. Leur passage dans une pompe met en évidence une fragmentation qui se stabilise

après un certain nombre de cycles. La surfusion est de l'ordre de 5 K, le comportement enthalpique étant celui de l'eau pure. L'homogénéité de l'écoulement nécessite de travailler à des vitesses supérieures à 1 m/s. Une corrélation de pertes de charge a été proposée. Les études du transfert de chaleur mettent en évidence une nette amélioration des échanges par rapport à un écoulement d'huile seule. Un facteur 4 est obtenu pour des concentrations en particules de 30 % environ. Une corrélation utilisable pour le dimensionnement des

échangeurs est proposée. Enfin, la mise en œuvre d'une méthode basée sur l'absorption IR a montré son efficacité au niveau laboratoire pour connaître l'état physique des particules, mais elle n'est pas applicable industriellement du fait de sa complexité.

Conclusion. Cette étude a permis de mettre en évidence la bonne potentialité de ce type de FFD (gains énergétiques de l'ordre de 15 %). Il reste cependant à procéder à des études de développement pour l'industrialiser.

André Lallemand
CETHIL

1. Laboratoire Matière et Structures Complexes, UMR 7057, CNRS-Université Paris VII (ancien LBHP)
2. Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008, CNRS-INSA-UCB
3. Unité de Recherche en Génie des Procédés frigorifiques, CEMAGREF Antony
4. Groupement de Recherche sur les Échangeurs thermiques, CEA Grenoble
5. Laboratoire de Thermique, Énergétique et Procédés, Université de Pau et des Pays de l'Adour

Pour en savoir plus :
Centre de Thermique de Lyon - UMR 5008
INSA
20, avenue Albert Einstein
69621 VILLEURBANNE cedex
andre.lallemand@insa-lyon.fr

4

ÉLECTRICITÉ SOLAIRE

Semi-conducteurs organiques : une voie alternative pour la conversion photovoltaïque ?

Aujourd'hui, plus de 90 % de l'électricité photovoltaïque est produite à partir de cellules en silicium cristallin. Leur rendement énergétique a lentement évolué de 8 % en 1982 jusqu'à 16 %, la valeur actuelle. Pour diminuer le coût du kilowattheure, une solution alternative consiste à fabriquer les cellules avec des semi-conducteurs organiques. Pour cela un certain nombre de points restent à résoudre, mais les rendements publiés atteignent déjà 5,7 %.

Évolution du photovoltaïque organique (PVO). Si l'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux organiques depuis plus de 30 ans, les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie η très faibles, de l'ordre 10^{-5} %. Dès 1978, Merritt [1] prévoyait que les valeurs de η pourraient dépasser les 1 %, mais ce n'est qu'en 1986 que ce rendement a été atteint [2]. Pendant les années qui suivirent, cette valeur a parfois été reproduite [3] mais elle n'a jamais été améliorée. Ce n'est que depuis le début du XXI^e siècle que le rendement a recommencé à croître, atteignant aujourd'hui les 5,7 % [4].

Principe de fonctionnement. Entre l'étape initiale où la lumière pénètre dans un convertisseur photovoltaïque organique et l'étape finale où des électrons sont collectés sur les électrodes, plusieurs processus physiques agissent successivement qui déterminent l'efficacité de la photoconversion. Les photons sont d'abord absorbés avec création d'excitons. Ces derniers, pour être dissociés en charges libres, doivent diffuser jusqu'à une jonction donneur-accepteur. Les conditions énergétiques (positions des HOMO – *Highest Occupied Molecular Orbital* – et LUMO – *Lowest Unoccupied Molecular Orbital* – des deux matériaux) doivent être satis-

faisantes pour que leur dissociation puisse s'effectuer. Enfin les porteurs libres doivent rejoindre les électrodes. Dans cette suite de processus physiques, chaque maillon de la chaîne est important et la faiblesse de l'un d'entre eux limite le rendement de conversion.

Paramètres importants. Ce sont donc : forte absorption, grande longueur de diffusion des excitons, possibilité d'ajuster les valeurs des HOMO et LUMO des donneurs et accepteurs et fortes mobilités des porteurs de charge.

Caractéristiques générales des matériaux. Pour augmenter la mobilité des charges et la longueur de diffusion des excitons, une des solutions



Figure 1. Croissance d'une phase cristal-liquide colonnaire obtenue par refroidissement d'un film mince d'une phase liquide de molécules discotiques. L'image a été obtenue par microscopie optique à contraste interférentiel, en réflexion (taille : 200 μm \times 150 μm). (© CRPP Bordeaux).

envisagées parmi d'autres consiste à utiliser des matériaux dont les molécules ont la forme de disques souples, permettant un bon contact entre molécules voisines (Fig. 1). Dans cette classe de matériaux, ceux qui possèdent une phase cristal-liquide sont préférés car ils possèdent en même temps un haut degré d'ordre et la fluidité et la malléabilité des liquides, ce qui permet la formation de couches très orientées qui offrent tout un éventail de propriétés anisotropes (en particulier la mobilité des porteurs). Des mobilités de trous de $10^{-1} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ont été mesurées dans des phases colonnaires ordonnées [5, 6]. Quelques cellules ont été produites à partir de cristaux liquides, mais l'organisation des molécules reste encore un défi important [7].

Le PVO et le programme ÉNERGIE du CNRS. Les molécules discotiques ont été synthétisées au CRPP (UPR8641) et plus particulièrement des arène-carboxylates et -dicarboximido-carboxylates colonnaires adaptés au transport de charges et d'excitons dans les composants optoélectroniques organiques. De nouveaux matériaux combinant le C_{60} avec des groupements donneurs discotiques ont été préparés au LCC (UPR8241). Les cellules ont été fabriquées au LGET (UMR5003) par évaporation sous vide et par "spin coating". Elles ont été caractérisées par des méthodes spécifiques qui ont permis de déterminer la longueur de diffusion des excitons, la mobilité des charges (temps de vol) et les grandeurs énergétiques HOMO et LUMO (sonde de Kelvin, voltamétrie cyclique, UPS). Lors de leur fonctionnement, traiter l'énergie électrique au plus près des cellules doit apporter un gain important en rendement de la totalité de la chaîne de conversion, ainsi qu'une augmentation de la fiabilité. C'est au LAAS (UPR8001) que sont étudiés les circuits de conversion d'énergie et plus particulièrement la réalisation d'inductances intégrées de faibles valeurs sur substrat de verre. Les travaux ont consisté à améliorer les performances des inductances, en particulier à réaliser de nouvelles structures intégrées permettant de diminuer la résistance

série du composant, tout en conservant une valeur élevée d'inductance.

Pierre Destruel, Isabelle Séguy,
LGET (Laboratoire de Génie
Électrique de Toulouse),
Harald Bock,
CRPP (Centre de Recherche
Paul Pascal),
Jean-François Nierengarten,
LCC (Laboratoire de chimie
de Coordination),
Corinne Alonso, Bruno Estibals,
LAAS (Laboratoire d'Analyse
et d'Architecture des Systèmes)

Pour en savoir plus :

www.lget.ups-tlse.fr ;

www.crpp.u-bordeaux.fr ;

www.lcc-toulouse.fr ; www2.laas.fr/laas

Bibliographie

- [1] V.Y. Merritt, IBM J. Res. Develop., 22 (1978) 353
- [2] C.W. Tang, Appl. Phys. Lett., 48 (1986) 183
- [3] D. Wöhrle and D. Meissner, Adv. Mater. 3, (1991) 129
- [4] J. Xue, *et al.*, Appl. Phys. Lett., 85 (2004) 5757
- [5] D. Adam, *et al.*, Nature, 371 (1994) 141
- [6] A. Van de Craats *et al.*, EKISHO, 2 (1998) 12
- [7] L. Schmidt-Mende *et al.*, Science, 293 (2001) 1119

BASES DE DONNÉES TECHNICO-ÉCONOMIQUES

TEHPOL, un observatoire des nouvelles technologies de l'énergie

Les bases de données dites technico-économiques sur les nouvelles technologies de l'énergie sont souvent développées en complément de travaux de prospective énergétique de long terme. Leur intérêt est de rassembler des données précises sur les technologies d'offre et de demande d'énergie sous une forme structurée et cohérente, à partir d'informations existantes mais souvent dispersées et peu comparables.

Des bases de données technico-économiques pour quoi faire ?

Les bases de données technico-économiques sont indispensables aux modèles sectoriels qui simulent le fonctionnement du système énergétique et nécessitent pour cela une description détaillée des principales technologies existantes et futures de production et d'usage de l'énergie. Ces systèmes d'information détaillés sont par ailleurs des instruments utiles de connaissance et de suivi des dynamiques de progrès technique dans le domaine de l'énergie car elles rassemblent à la fois des données observées

sur l'évolution des performances constatées (laboratoire, présérie ou exploitation industrielle) et des données anticipées sur des performances futures (à court terme) ou prospectives (à plus long terme).

La base de données TEHPOL sur les nouvelles technologies de l'énergie. La base de données TEHPOL a été développée par le LEPII (Laboratoire d'Économie de la Production et de l'Intégration Internationale) à l'origine dans le cadre du programme ÉNERGIE du CNRS puis de plusieurs projets des PCRD européens. Elle couvre aujourd'hui plus de cinquante technologies

génériques relevant de quatre grandes familles :

- les moyens de production d'électricité de grande puissance (thermique à flamme, turbines à gaz, hydraulique, nucléaire, ...) avec et sans séquestration du carbone ;
- les moyens distribués de production d'électricité et énergies renouvelables (éolien, solaire, hydraulique, biomasse, etc.) ;
- la production d'hydrogène (réformage, gazéification, hydrolyse, ...) ;
- les technologies de demande (véhicules individuels, matériaux, etc., en développement).

Pour chaque technologie, différents types de données sont collectés de façon systématique : durée de vie, rendement, disponibilité, durée de construction, coûts d'investissement, coûts de fonctionnement et de maintenance, etc. Ces données, complétées par des informations sur la technologie, l'année de référence, la source utilisée, etc., couvrent la période 1990-2050.

La base de données TECHPOL. Elle comporte deux grands ensembles aux fonctions complémentaires :

- La collecte des données : cette partie rassemble et organise les données disponibles dans la littérature (ou auprès des équipes de modélisateurs) et permet après analyse de produire des valeurs de référence pour les technologies génériques.

- Les coûts de référence : cette partie se compose d'un outil de calcul qui permet, à partir des valeurs de référence, de comparer avec une méthodologie standard les coûts complets de production pour les technologies de l'électricité ou de l'hydrogène.

Un outil de comparaison des coûts. Une base de données de ce type permet notamment d'estimer avec précision les coûts moyens des technologies de production d'électricité qui seront ensuite utilisés par les modèles

coûts de référence. On peut ainsi situer le coût moyen d'investissement dans une centrale thermique au charbon aux alentours de 1 100 €/kW (en € 2000) et le surcoût d'un dispositif de capture du CO₂ à 800 €/kW, soit près de 75 % du coût initial. La base TECHPOL permet également de comparer les coûts complets (coûts fixes et coûts variables) pour les différents moyens de production d'électricité en appliquant une procédure standard. A titre d'exemple, la figure 1 montre la sensibilité des coûts de production d'électricité à une valeur croissante de la taxe carbone et l'avantage économique des options n'émettant pas de gaz carbonique (renouvelables, nucléaire ou capture et stockage).

Perspectives. Cet outil centré à l'origine sur les seules technologies de production d'électricité s'élargit progressivement à d'autres secteurs (l'hydrogène

d'abord puis les transports et les matériaux) dans lesquels les choix technologiques auront également une influence déterminante sur la consommation future d'énergie.

Philippe Menanteau
LEPII – EPE (Énergie et Politiques Environnement) (CNRS/Université P. Mendès France) Grenoble

Pour en savoir plus :
Philippe.menanteau@upmf-grenoble.fr

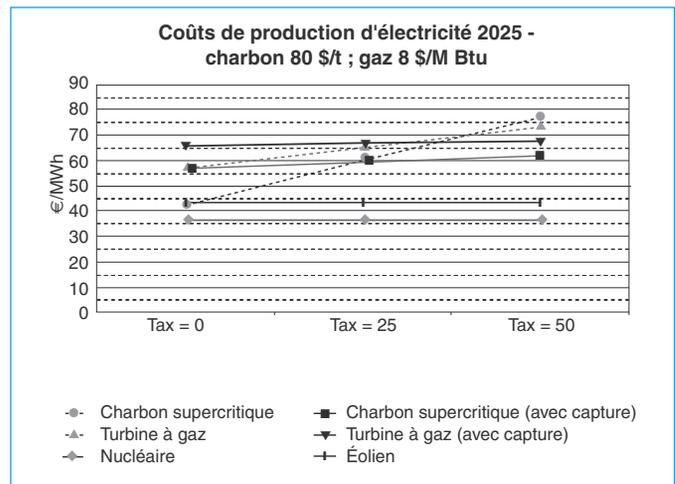


Figure 1. Coûts de production d'électricité et taxe carbone (© TECHPOL).

6

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

La fission au futur : scénarios

Les menaces de dérèglements climatiques dus aux émissions de gaz à effet de serre (EGES), la raréfaction des énergies fossiles faciles à transporter et à utiliser, la grande dépendance énergétique de toutes nos sociétés développées ou non, justifient des études très précises et très concrètes sur la production d'énergies sans EGES dont fait partie l'énergie nucléaire de fission. L'étude des scénarios de déploiement de cette énergie est l'objet d'une des actions du programme interdisciplinaire ÉNERGIE du CNRS.

Programme ÉNERGIE. Des équipes CNRS travaillent dans ce cadre sur les différents types de réacteurs nucléaires capables de produire durablement une partie significative de l'énergie nécessaire au niveau de la planète, de même que sur les différentes contraintes de déploiement de cette énergie.

Filières à uranium enrichi. Les filières actuelles consomment essentiellement l'uranium-235, seul noyau fissile naturel et présent à 0,7 % dans le minerai d'uranium (99,3 % est de l'uranium-238). Pour faire fissionner une tonne

de matière, il est nécessaire d'extraire 200 tonnes d'uranium naturel, soit un taux d'utilisation du minerai très faible. Les réserves estimées d'uranium (environ 16 millions de tonnes) ne permettent pas d'envisager un déploiement durable d'une énergie nucléaire significative au niveau mondial basé sur les filières à uranium enrichi.

Filière à régénération. L'essentiel du minerai (²³⁸U ou ²³²Th) ne fissionne pas, mais quand il capture un neutron, il produit un noyau susceptible de fissionner, dit "fissile", qui produira donc de l'énergie : U-238 + n → Pu-239 et

Th-232 + n → U-233. On parle alors de régénération : dans ce cas, tout le minerai (dit alors "fertile") est utilisé, et le problème des réserves est réglé pour des millénaires.

Le cycle uranium. Celui-ci nécessite, pour atteindre la régénération, d'avoir des neutrons de haute énergie (réacteurs à neutrons rapides ou RNR). Le déploiement de tels réacteurs est pénalisé par un inventaire important en matière fissile : le démarrage d'un RNR U/Pu mobilise tout le plutonium produit par un réacteur actuel pendant 50 ans de fonctionnement (environ

12 tonnes). Là encore, il est impossible d'assurer un déploiement rapide du nucléaire basé sur cette seule filière.

Le cycle thorium. Il permet quant à lui de réduire drastiquement la masse de matière fissile nécessaire au démarrage. Avec les 12 tonnes de matière fissile citée précédemment, on peut démarrer au moins quatre réacteurs au thorium (contre un seul RNR) et on est ainsi plus à même de s'adapter à de brutales variations de la demande d'énergie nucléaire. La principale difficulté du cycle thorium réside dans le fait que le combustible doit être retraité très régulièrement. Le concept de réacteur à sel fondu (combustible liquide) est tout à fait adapté à l'utilisation de ce cycle,

puisqu'il permet de traiter le combustible en continu.

Scénarios de déploiement. Les travaux effectués dans le cadre du programme ÉNERGIE portent sur les études de scénarios, qui permettent de quantifier en détail tous les paramètres d'un parc de réacteurs faisant appel à diverses technologies. On s'intéresse notamment à chiffrer les quantités de matières envoyées aux déchets, selon la mise en œuvre ou non de la transmutation, ou selon le cycle utilisé (uranium ou thorium). On s'intéresse également à dimensionner les usines de retraitement afin d'assurer une transition continue entre les réacteurs actuels et les réacteurs du futur. L'impact sur les

usines du cycle des diverses filières envisagées est également quantifié (chaleur des combustibles usés ou frais, doses gamma, neutrons, alpha, ...).

Sylvain David
*Institut de Physique Nucléaire,
UMR 8608 CNRS/IN2P3-
Université Paris XI, Orsay*

Jean-Marie Loiseaux
*Laboratoire de Physique
subatomique et de cosmologie –
UMR 5821 CNRS IN2P3-
UJF Grenoble*

Pour en savoir plus :
<http://lpsc.in2p3.fr/>, <http://ipnweb.in2p3.fr/>

ÉNERGIES MARINES

Énergie des vagues

La mer recèle toutes les ressources dont l'humanité a besoin. Nous le savons, mais nous le négligeons tout de même. Tout comme les animaux ou les végétaux marins, l'énergie (thermique, mécanique, osmotique, ...) est aussi une ressource de l'océan. La puissance des vagues peut être énorme, mais il faut qu'un tsunami ravage tout sur son passage pour qu'on s'en souvienne !

Une ressource immense. Les vagues sont créées par le vent qui souffle à la surface des océans. L'énergie mécanique (potentielle + cinétique) qu'elles transportent reste confinée dans les deux premières dizaines de mètres sous la surface, et représente donc une forme concentrée d'énergie d'origine solaire (de l'ordre de 2500 W/m^2 en moyenne sur nos côtes). Le flux d'énergie se mesure en kilowatts par mètre de front de vague, en moyenne annuelle sur un site donné (de l'ordre de 45 kW/m dans le Golfe de Gascogne, pour atteindre 100 kW/m au Cap Horn). Cette énergie est transportée par les vagues avec une très faible dissipation sur des distances qui peuvent atteindre des milliers de kilomètres. La puissance globale ainsi transférée de l'atmosphère vers la mer est en moyenne de l'ordre de $1,5$ à 2 TW , soit un ordre de grandeur comparable à la puissance électrique installée au niveau mondial.

Des techniques variées. Les systèmes proposés pour récupérer cette énergie ne manquent pas (quelques $4\ 000$ brevets recensés dans le monde depuis 1975 !). Quelques-uns sont farfelus, beaucoup sont pertinents, mais très peu ont donné lieu à la construction de prototypes qui aient survécu à l'épreuve

de la mer. Ils se classent en trois grandes familles : les systèmes à déferlement, les systèmes à colonne d'eau oscillante, et ceux qui sont basés sur le mouvement de corps mus par les vagues, auxquels il faudrait rajouter tous les inclassables !

Où en est-on ? Les recherches ont sérieusement démarré dans les laboratoires après les chocs pétroliers, à la fin des années 1970. Arrêtées au milieu des années 1980, comme pour d'autres énergies renouvelables (ENR), par le contre-choc pétrolier, elles ont finalement repris dans les années 1990, principalement en Europe (Royaume-Uni, Norvège, Danemark, Portugal, Irlande, France), mais aussi au Japon, en Inde en Chine, et plus tardivement aux États-Unis. Une première génération de systèmes côtiers (à colonne d'eau oscillante) a été finalisée en 2000 et deux centrales de ce type, en partie financées par la CE, produisent des kilowattheures "bleus" en Europe. Ces systèmes ont permis de montrer la faisabilité de cette filière, mais leur implantation sur le littoral rendrait leur généralisation problématique. Aujourd'hui, on développe une seconde génération de systèmes qui seront installés offshore, donc sans nuisance visuelle, et dans de meilleures conditions de ressources puisque l'énergie des vagues décroît en arrivant à la

côte. On verra donc des séries de modules flottants mouillés au large, constituant des "fermes houlomotrices" de plusieurs dizaines de mégawatts. La première de ces fermes (3 modules PELAMIS de 750 kW chacun) est en cours d'assemblage au large du Portugal pour l'été 2006.

Et en France ? Le déploiement de cette technologie sur les côtes britanniques et portugaises est lié à des tarifs de rachat très intéressants offerts pour l'électricité d'origine houlomotrice par ces deux pays qui tentent ainsi de prendre le leadership. Dans l'attente d'une telle mesure, l'activité sur cette filière se résume à deux ou trois projets en France, dont le projet SEAREV développé par le CNRS à l'École Centrale de Nantes. Il s'agit d'un module flottant de seconde génération (500 kW) basé sur un principe de pendule embarqué avec un contrôle adaptatif optimisant la production par entretien d'une résonance paramétrique en temps réel, vague après vague. Mise à l'eau du prototype en 2009, si tout va bien !

Alain H. Clément
*ECN
Laboratoire de Mécanique des Fluides*

Pour en savoir plus : www.iea-oceans.org

MANIFESTATIONS

15^e Conférence l'IUAPPA, Air pollution and environmental health, du 6 au 8 septembre à Lille.

www.iuappa-lille2006.org

EOLE 2006, du 11 au 15 septembre, à Lastours
www.ademe.fr

33^e Congrès de la FNCCR, Ouverture des marchés de l'énergie à la concurrence pour les consommateurs domestiques, du 12 au 15 septembre à Bordeaux.

www.fnccr.asso.fr

Biodépollution et environnement, du 12 au 13 septembre, à Paris.

www.sfm.asso.fr

Le marché des quotas d'émission de CO₂ : une nouvelle étape. Colloque organisé par l'ATEE, en collaboration avec EPE et CITEPA, le 10 octobre à Paris.

www.atee.fr

Les nouvelles techniques de combustion, séminaire organisé par l'ATEE, le 17 octobre à Paris.

www.atee.fr

Salon écobuilding, 1^{er} salon européen de la performance énergétique et du développement durable des bâtiments, du 8 au 9 novembre, à Paris Porte de Versailles
www.cler.org

5^e colloque national ÉOLIEN, du 16 au 18 novembre, à Amiens.

www.ademe.fr

POLLUTEC 2006, du 28 novembre au 1^{er} décembre 2006, à Lyon Eurexpo.

www.pollutec.com

ACTUALITÉ DE NOTRE PARTENAIRE

ECRIN

• Groupes de travail

- **Analyse du cycle de vie des matériels constitutifs dans la conception des alimentations hybrides.** Réunion du groupe de travail ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE/CONVERSION DE L'ÉNERGIE, le 1^{er} septembre 2006 de 9 h 30 à 12 h 30, ECRIN.

Contact : Hélène Auger (auger@ecrin.asso.fr)

- **La thermique dans les applications du génie électrique.** Réunion du groupe de travail ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE/CONVERSION DE L'ÉNERGIE, le 14 septembre 2006 de 14 h 00 à 17 h 00, ECRIN.

Contact : Hélène Auger (auger@ecrin.asso.fr)

- **Objectif 2050.** Réunion du groupe de travail ÉNERGIE, le 25 septembre 2006 de 9 h 30 à 12 h 00, ECRIN.

Contact : Christian Ngô (ngo@ecrin.asso.fr)

- **Prospective sur les carburants.** Réunion du groupe de travail ÉCONOMIE ET STRATÉGIE, le 27 septembre 2006 de 9 h 30 à 12 h 30, ECRIN.

Contact : Catherine Côme (come@ecrin.asso.fr)

- **Compatibilité électromagnétique.** Réunion du groupe de travail ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE/CONVERSION DE L'ÉNERGIE, le 26 octobre 2006 de 9 h 30 à 17 h 00, ECRIN.

Contact : Hélène Auger (auger@ecrin.asso.fr)



• Colloques

- **Nanomatériaux pour l'énergie,** colloque organisé par ECRIN – NANO-MATÉRIAUX, le 9 novembre 2006, de 9 h 00 à 17 h 00, au Sénat.

Contact : Véronique Thierry-Mieg (thierry-mieg@ecrin.asso.fr)

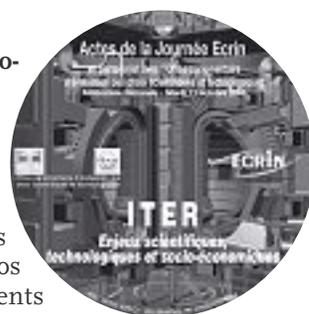
- **Nanomatériaux pour l'environnement,** colloque organisé par ECRIN – NANO-MATÉRIAUX, le 10 novembre 2006, de 9 h 00 à 17 h 00, au Sénat.

Contact : Véronique Thierry-Mieg (thierry-mieg@ecrin.asso.fr)

• Parution

- **ITER - Enjeux scientifiques, technologiques et socio-économiques**

CD-Rom des Actes de la Journée Ecrin du 11 octobre 2005 à l'Assemblée Nationale, en partenariat avec l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Il regroupe l'intégralité des débats au format MP3 ; les résumés des interventions et les supports de présentation au format PDF (30 euros pour les non-adhérents et 20 euros pour les adhérents d'Ecrin).



- **Recherche, Technologie & Société**

Revue trimestrielle du réseau Ecrin : chaque trimestre, une vision des évolutions dans 8 grands domaines : Agroalimentaire ; Biologie, biotechnologies et santé ; Économie et société ; Énergie ; Environnement ; Matériaux et procédés ; Optoélectronique ; Risques, pour être au cœur de la relation recherche-entreprise.

Plus d'informations sur : <http://www.ecrin.asso.fr>

Éditions T.I.

(membre du Groupe Weka Business Information)

249, rue de Crimée

75925 Paris Cedex 19

Tél. : 01 53 35 20 00

Fax : 01 40 38 20 22

www.techniques-ingenieur.fr

Abonnement : 76 euros par an (6 numéros/an).

17 euros le numéro

Directeur de la publication :

André Blanc

Directeur des Éditions T.I. :

Bruno Declémenti

Directeur de la rédaction :

Marc Chabreuil

Responsable d'édition :

Angela Martin

Conseillers scientifiques/Comité de lecture :

Gérard Guarracino, directeur du Département Génie Civil et Bâtiment, URA CNRS 1652, École Nationale des Travaux Publics de l'État

André Lallemand, professeur des Universités à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
Roland Vidil, directeur de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Électriciens de Grenoble

Impression : Bialec (Nancy)

Tirage : 5 500 exemplaires

Commission paritaire : en cours

© La Lettre TI - Energies