



## Regards de chercheurs sur un sujet interdisciplinaire : l'énergie

**I**l y a 200 ans seulement débutait l'industrialisation du monde : à cette époque la vapeur a révolutionné le transport, le commerce, la métallurgie ou le textile. De nos jours, et particulièrement en cette Année internationale, les citoyens et les politiques ont pris conscience de la place centrale de l'énergie dans la société. Nos modes de vie et de consommation produisent des gaz à effet de serre, le réchauffement climatique s'accélère, il faut donc agir.

Depuis l'émergence du concept de développement durable, chaque secteur de l'économie s'empare de la question et tente, notamment avec l'aide des chercheurs spécialistes du domaine, d'y apporter des réponses. Ce « Petit illustré », qui présente les résultats de recherches récentes menées en Midi-Pyrénées sur le thème de l'énergie, permet de saisir la complexité du problème et la diversité des solutions.

Chercher, c'est avant tout explorer, tester des hypothèses, proposer des pistes, mais aussi évaluer les bénéfices réels d'une innovation. Il faut prendre le temps de critiquer son propre travail avec recul et humilité, et de se confronter aux collaborateurs de tous les pays. En effet, notre culture nous influence profondément dans nos travaux, c'est pourquoi il est essentiel de partager les recherches entre disciplines et à l'échelle du monde.

Réduire l'impact de notre consommation, mieux consommer et développer les énergies renouvelables : rendez-vous dans 10 ou 20 ans pour voir lesquelles de ces pistes auront fait leurs preuves et seront intégrées aux innovations. À l'occasion de la Fête de la Science, dont le programme régional constitue l'encart central, venez rencontrer les chercheurs qui font de l'énergie leur préoccupation majeure : tous sur le pont !



RÉDUIRE L'IMPACT DE NOTRE CONSOMMATION



### contributeurs

Christophe Beslay,  
Marie-Christine Zélem  
Centre d'Étude et de Recherche Travail,  
Organisations, Pouvoirs  
Unité mixte de recherche 5044  
Université Toulouse II/CNRS/Université Toulouse III

Les nouveaux enjeux énergétiques obligent à repenser nos modèles de sociétés et à réfléchir sur la place de la technique.

# RÉDUIRE L'IMPACT DE NOS CONSOMMATIONS



Lorsqu'on parle d'énergie on pense aux ressources énergétiques, à leur exploitation, aux technologies qui permettent leur extraction, leur transformation ou leur distribution. Et lorsqu'on pense énergie et société, on réfère aux multiples

technologies qui permettent à nos sociétés de fonctionner (industrie, transports, services...) mais aussi aux équipements qui ont envahi nos lieux de vie et contribuent à améliorer nos modes de vie en termes de confort.

# ÉNERGIE ET SOCIÉTÉS : la place des usagers

Parler d'énergie c'est donc parler de technologies. Mais on oublie trop souvent que ces technologies résultent de choix en amont, encadrés par des politiques publiques. Ces technologies sont ensuite mises au point, puis mises en œuvre, améliorées, diffusées par une série d'acteurs intermédiaires (des ingénieurs, des professionnels du bâtiment, des fabricants et des distributeurs, des installateurs, des vendeurs et autres prescripteurs...). Enfin, elles sont utilisées par des utilisateurs qui prennent diverses figures telles celle de l'utilisateur, du consommateur ou de l'habitant. Ces trois univers (gouvernance des choix, conception et diffusion des solutions techniques, usages) invitent les disciplines des sciences sociales à réfléchir aux conditions d'émergence des innovations technologiques, aux conditions de leur acceptabilité et de leur appropriation sociales, ainsi qu'aux conditions de leur développement. Cette posture contraste avec celle, habituellement adoptée, qui consiste à faire le pari que la technique est universelle, et qui conduit à occulter la complexité sociale et la diversité des pratiques sociales.

C'est pourquoi il semble fondamental de combiner l'analyse technique à une analyse plus sociologique pour raisonner selon une approche de type sociotechnique.

## INTÉGRER LA PART SOCIALE DES TECHNIQUES

En Occident, nos sociétés de consommation se sont développées sur la base d'une relative abondance énergétique. La gestion et l'utilisation de l'énergie structurent fortement l'aménagement des territoires et l'organisation de l'espace social. Nos villes reposent sur des modes d'organisation largement dépendants de réseaux de transports, eux-mêmes très inscrits dans une dépendance aux réserves pétrolières. Nos modes de vie, nos déplacements, nos manières d'habiter, nos façons de consommer se sont alors construits selon un principe énergivore.

Aujourd'hui, alors que le changement climatique se fait plus préoccupant, et les ressources fossiles plus rares, on questionne le sens du progrès, la confiance illimitée dans l'évolution des systèmes techniques.

En France par exemple, jusqu'au Grenelle de l'environnement, les questions énergétiques, monopole des grands corps de l'État, n'étaient pas présentes dans le débat démocratique. Or force est de constater que face aux enjeux énergétiques et environnementaux, il convient de changer de paradigme. Cela ne semble envisageable qu'en repensant la place de la technique dans nos sociétés, la place des hommes dans cet univers technique. Le projet de transition énergétique ne peut alors s'envisager qu'en innovant dans le sens de l'usage, en intégrant les usages le plus en amont possible dès la conception. Cela suppose de nouvelles manières d'aborder la science, selon des approches interdisciplinaires qui intègrent la part sociale des techniques en prenant en compte les dynamiques humaines et sociales, ainsi que la diversité des systèmes politiques, économiques et culturels. L'enjeu partagé est bien d'apporter des réponses plus efficaces aux problèmes énergétiques contemporains. Il s'agit d'introduire une sociologie des modes de vie et des usages énergétiques au cœur de l'ingénierie du bâtiment, à la fois pour rapprocher les acteurs humains des objets techniques et architecturaux qui leur sont destinés, et pour mieux construire les conditions sociotechniques de la performance énergétique. ●



Face aux enjeux énergétiques et environnementaux, il faut changer de paradigme



# LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE du CO<sub>2</sub>



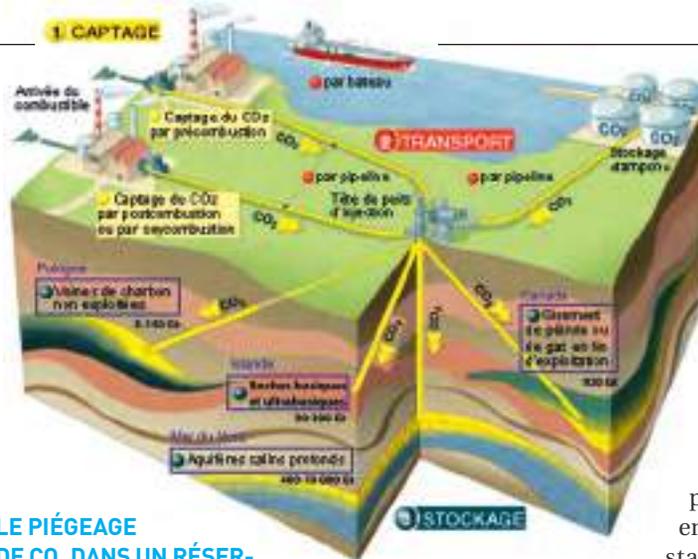
## contributeur

Pascale Bénézeth  
Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse  
Unité mixte de recherche 5563  
CNRS/Université Toulouse III/IRD/CNES



Depuis la révolution industrielle, le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), principal gaz à effet de serre, a vu sa teneur atmosphérique augmenter de plus de 40 % en lien avec les activités humaines. La communauté scientifique internationale admet aujourd'hui que cette augmentation de CO<sub>2</sub> entraîne des changements climatiques, porteurs à court terme de conséquences dramatiques pour l'homme et son environnement. Parmi les diverses solutions envisagées pour stabiliser voire réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, la capture et le stockage du CO<sub>2</sub> peuvent jouer un rôle décisif. Les programmes de recherche nationaux et européens auxquels nous participons sont donc consacrés à la séquestration géologique du CO<sub>2</sub>. On estime les capacités mondiales de stockage géologique entre 1200 et 10 000 Gigatonnes de CO<sub>2</sub>, à comparer aux 30 Gt émises annuellement au plan mondial.

L'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique entraîne des changements climatiques lourds de conséquences pour l'environnement. La capture et le stockage du CO<sub>2</sub> sont une des solutions pour réduire sa teneur atmosphérique.



## LE PIÉGEAGE DE CO<sub>2</sub> DANS UN RÉSERVOIR NATUREL SE FAIT EN PLUSIEURS ÉTAPES

10 à 20 % du volume de CO<sub>2</sub> sont piégés dans les pores de la roche, c'est le piégeage hydrodynamique et structural. Le CO<sub>2</sub> va ensuite se dissoudre dans le fluide en place, c'est le piégeage par dissolution. Enfin, le CO<sub>2</sub> dissous va réagir avec les minéraux primaires présents dans les formations géologiques pour former des minéraux carbonatés secondaires. Il s'agit

↳ Stockage géologique du CO<sub>2</sub>  
Différentes options de capture, transport et stockage du CO<sub>2</sub> (d'après une illustration de Total).

là du piégeage minéral, auquel nos recherches s'intéressent depuis une dizaine d'années car il permet de convertir le CO<sub>2</sub> en une forme immobile et stable sur de très longues durées, les carbonates. Nous nous focalisons en particulier sur

la détermination expérimentale des paramètres cinétiques et thermodynamiques des espèces aqueuses et des phases solides susceptibles de contrôler le piégeage de ce gaz sous forme dissoute ou solide. Ces paramètres sont nécessaires à la simulation numérique du transport réactif du CO<sub>2</sub> injecté dans des réservoirs naturels. ●

# DES PROCÉDÉS INNOVANTS pour piéger le CO<sub>2</sub>

La carbonatation minérale *ex situ* permet de piéger le CO<sub>2</sub> de manière pérenne dans un carbonate solide. Cette voie représente une solution à fort potentiel.



La nécessité et l'urgence de réduire les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> a conduit à la ratification du protocole de Kyoto par la quasi-totalité des pays du monde. En parallèle à une meilleure utilisation de la ressource énergétique et au développement des

énergies renouvelables, cette réduction doit s'appuyer sur des technologies de capture et stockage du CO<sub>2</sub> applicables à grande échelle. La carbonatation minérale *ex situ* consiste à piéger le CO<sub>2</sub> de manière pérenne dans un carbonate solide formé par réaction entre le CO<sub>2</sub> et un solide magnésien ou calcique. Cette voie représente une solution à fort potentiel du fait de l'abondance des matériaux naturels capables de piéger le CO<sub>2</sub> : roches basiques et ultrabasiques provenant de l'écorce terrestre telles que la serpentine ou l'olivine, mais aussi résidus miniers et industriels pour lesquels cette voie serait une méthode d'inertage ou, mieux encore, de valorisation. Par sa capacité et son innocuité, la carbonatation minérale est une option complémentaire au stockage géologique. Plus particulièrement, la carbonatation directe en voie aqueuse repose sur la dissolution des minéraux et la précipitation des

carbonates à température et pression de CO<sub>2</sub> modérées. Il s'agit de reproduire en quelques heures des processus que la nature réalise sur des temps géologiques, en mettant en œuvre des conditions favorables et une surface réactive plus élevée. Les chercheurs étudient différentes voies capables d'activer ces mécanismes et de lever les limitations existantes telles que la formation de sous-produits piégeant le métal ou passivant le matériau. Ces développements passent par une approche expérimentale et une modélisation des équilibres et dynamiques des systèmes roches -CO<sub>2</sub>- eau. Ces travaux ont permis d'écarter des voies pourtant annoncées comme prometteuses dans des travaux antérieurs et d'en proposer de nouvelles, qui ont déjà permis de convertir 80 % d'une roche carbonatable en quelques heures. ●

## Stockage de CO<sub>2</sub> *ex situ* ⇨

Observation au microscope électronique à balayage de particules de magnésite (MgCO<sub>3</sub>) formées par carbonatation accélérée en voie aqueuse d'olivine (silicate magnésien).

© François Guyot (IMPMC/IPGP, Paris)



## contributeurs

Florent Bourgeois, Carine Julcour  
Laboratoire de Génie Chimique  
Unité mixte de recherche 5503  
INPT/CNRS/Université Toulouse III





# Émissions de polluants **GAZEUX ET PARTICULAIRES**

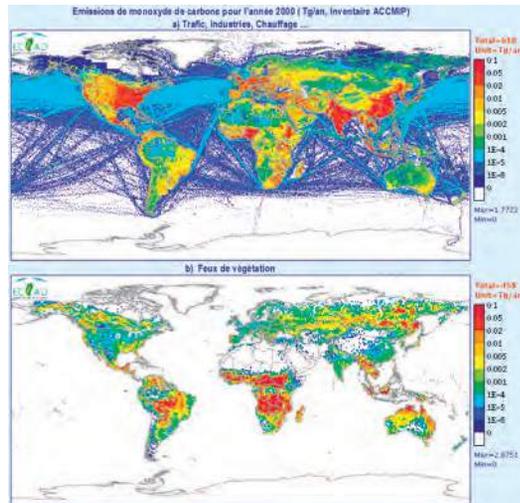
liées aux combustions de combustibles fossiles et de biomasse



## contributeur

Catherine Liouise  
Laboratoire d'Aérodologie  
Unité mixte de recherche 5560  
CNRS/Université Toulouse III

**Connaître et inventorier les émissions de polluants dans l'air sont des étapes indispensables pour mesurer l'impact de la pollution sur la qualité de l'air et le climat.**



### Deux sources de monoxyde de carbone

Émissions de monoxyde de carbone pour l'année 2000 (Inventaire ACCMIP, issu de la base de données ECCAD)



Connaître et inventorier les émissions de polluants dans l'air est nécessaire pour mesurer l'impact de la pollution sur la qualité de l'air et sur le climat : ces données sont indispensables

pour alimenter les modèles atmosphériques et de climat. Les scénarios d'émission ainsi associés à ces modèles numériques permettent d'anticiper les bouleversements climatiques et contribuent à l'amélioration de la qualité de l'air, de la santé et des milieux de vie des populations. Parmi les polluants gazeux et particulaires, on note l'importance des sources de combustion : transport (routes, bateaux, avions...), énergie, industries, centrales thermiques, feux domestiques et feux de végétation. La figure ci-contre représente les émissions de monoxyde de carbone à l'échelle globale pour l'année 2000. Les émissions anthropiques (trafic, industries...) sont du même ordre de grandeur (610 Tg/an) que les émissions par les feux

(458 Tg/an). Les émissions par les feux (b) sont surtout importantes en Afrique, en Amérique du Sud, en Asie et en Sibérie alors que les autres émissions (a) le sont partout dans le monde.

### INTERROGATIONS SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS NOS SOCIÉTÉS

L'augmentation de ces émissions s'observe aujourd'hui sur tous les continents, aussi bien dans les pays développés que dans les pays émergents et en voie de développement. Mais c'est dans ces derniers que les niveaux d'émission connaissent la plus forte augmentation et nourrissent le plus d'inquiétudes. Ces informations soulèvent évidemment des questions fondamentales sur nos modèles de société en matière de consommation d'énergie, d'industrialisation et de pratiques agricoles, d'exploitation des ressources minières et pétrolières, de transports... Elles pointent également l'urgence d'une véritable coopération entre communautés scientifiques et décideurs. ●

# Hydroélectricité et GAZ À EFFET DE SERRE

Les émissions de gaz à effet de serre par les barrages sont, dans certaines régions du monde, équivalentes à celles des centrales thermiques.



Dans le contexte climatique actuel, il est nécessaire de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). On compte en particulier sur le développement des énergies renouvelables (EnR) pour stabiliser le dioxyde de carbone atmosphérique autour de 450 ppm à l'échéance de 2050. L'hydroélectricité est une EnR supposée neutre du point de vue des émissions de GES. Un doublement de la production hydroélectrique est attendu d'ici à 2035, ou plus tôt vu la demande croissante en énergie des pays de la ceinture tropicale, dans lesquels 60 à 90 % du potentiel hydroélectrique est encore inexploité. Les émissions de GES par les barrages sont encore mal quantifiées car moins de 10 des 45 000 grands barrages ont été étudiés. La mise en place d'un barrage transforme un écosystème fluvial et continental, en général puits de carbone, en un écosystème lacustre source de GES. Dans les barrages, les GES sont produits par la dégradation de la matière

organique (MO) submergée (sols et végétation) et de la MO provenant du bassin versant. C'est dans les zones tropicales, en raison de conditions favorables aux émissions de GES (température et quantité de matière organique élevées) que les réservoirs produisent les effets les plus marqués. Les émissions par les barrages situés en zone tropicale sont équivalentes aux émissions par les centrales thermiques à gaz, fioul ou charbon. Le qualificatif « énergie propre » attribué aux barrages mérite donc débat. La perturbation anthropique liée aux barrages sera mieux estimée quand les barrages dans les différentes zones climatiques auront été étudiés, et quand les émissions avant mise en eau auront été intégrées aux estimations. À l'avenir, le développement d'outils de modélisation permettra d'extrapoler ces émissions, de prévoir leur évolution dans le temps, ainsi que d'évaluer les approches pour les atténuer. ●



**Hydroélectricité et gaz à effet de serre**  
Mesures de flux de CO<sub>2</sub> et méthane à la surface du barrage de Nam Theun 2 au Laos.  
© Dominique Serça



## contributeurs

**Dominique Serça**  
Laboratoire d'Aérodynamique  
Unité mixte de recherche 5560  
CNRS/Université Toulouse III

**Frédéric Guérin**  
Laboratoire Géosciences  
Environnement Toulouse  
Unité mixte de recherche 5563  
CNRS/Université Toulouse III/IRD/CNES

## Émission moyenne de CO<sub>2</sub> en grammes par KWh d'électricité produite

↳ **400 à 1200** : centrales thermiques à gaz, fioul ou charbon

↳ **290** : barrage hydroélectrique de Nam Theun 2, Laos

↳ **1 à 118** : autres énergies renouvelables et nucléaire



# LE THORIUM : une alternative à l'uranium comme source d'énergie nucléaire



## contributeurs

Pierre Chamelot, Laurent Massot,  
Laurent Cassayre, Mathieu Gibilaro  
Laboratoire de Génie Chimique  
Unité mixte de recherche 5503  
INPT/CNRS/Université Toulouse III

Un grand programme vient d'être lancé pour étudier tous les enjeux liés à l'utilisation de l'énergie nucléaire issue de la fission de l'uranium et du thorium. Coordonné par la Mission pour l'interdisciplinarité du CNRS, le programme Needs (Nucléaire Énergie Environnement Déchets et Société), a pour but d'évaluer objectivement cette énergie en prenant en compte les risques qu'elle implique et son impact sur l'environnement.

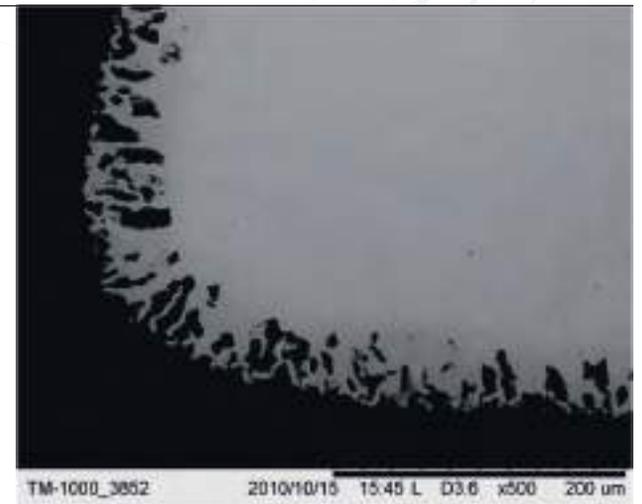


ans cette filière, des exigences plus fortes vont se manifester pour ce qui concerne la gestion des déchets de longue vie et la préservation des réserves en ressources naturelles : on estime que dans une centaine d'années

les ressources mondiales en uranium à ce jour seront épuisées si l'on se base sur les technologies actuelles de réacteurs nucléaires. Depuis le début des années 2000, six concepts de réacteurs dits « de Génération IV », permettant de satisfaire des critères de préservation des ressources et de réduction des déchets engendrés, sont étudiés dans le cadre du programme « Forum International Génération IV » (GIF IV) qui regroupe 10 pays.

Le concept de réacteur à combustible thorium repose sur un cœur constitué d'un mélange de fluorures contenant le combustible nucléaire (tétrafluorure de thorium

ThF<sub>4</sub>). L'atout de ce type de réacteur réside dans un rendement énergétique élevé dû à l'emploi de températures de fonctionnement autour de 600-800°C. Il permet également de réduire la production de déchets radiotoxiques à durée de vie longue, d'améliorer la sécurité intrinsèque et d'intégrer un recyclage en ligne du combustible. Ceci ouvre la possibilité de regrouper sur un même site un réacteur et son usine de retraitement. Par ailleurs, il repose sur l'utilisation de thorium dont les ressources sont importantes notamment en France. En Midi-Pyrénées, les chercheurs contribuent au développement de ce nouveau concept de réacteur en mettant l'accent sur l'étude de la corrosion des matériaux de structure, sur la chimie du thorium et de ses dérivés dans ces milieux particuliers que sont les sels fondus, ainsi que sur les procédés de séparation permettant d'assurer tout à la fois un recyclage du combustible et une réaction de fission optimale. ●



### Observation de la corrosion

Frange de corrosion d'un alliage Ni-W-Cr après immersion dans le sel fondu LiF-NaF à 750°C pendant une durée de 900 h.

# LA FUSION NUCLÉAIRE : allumer un soleil sur la Terre...

Dans son principe, la fusion nucléaire est un moyen simple de produire de l'énergie. Cependant, sa mise en œuvre pratique se heurte encore à de nombreux obstacles.



n réacteur de fusion nucléaire fonctionne un peu comme une bougie. Tous deux produisent de l'énergie sous forme de chaleur et de rayonnement induits par une réaction : une combustion chimique entre la cire chauffée et l'oxygène

de l'air pour la bougie, une fusion nucléaire entre deux dérivés de l'hydrogène, deutérium et tritium, pour le réacteur. Dans les deux cas, cette réaction doit être amorcée par une « allumette », qui apporte l'énergie nécessaire au démarrage du processus. Mais cette ressemblance se limite aux principes de base. Bougie et réacteur de fusion diffèrent radicalement par les ordres de grandeur des énergies mises en jeu. À masse de combustible égale, une réaction de fusion permet de produire un million de fois plus d'énergie qu'une combustion chimique.

Autre différence : la taille de « l'allumette ». Les réactifs de fusion doivent être portés à une température de 150 000 000 °C, 10 fois plus qu'au cœur du soleil !

Pour atteindre de tels extrêmes, on utilise en particulier un « injecteur de neutres », qui est un faisceau d'ions hydrogène négatifs, accélérés par de très hautes tensions puis neutralisés électriquement.

Par de très violentes collisions, ce faisceau cède son énergie aux réactifs qui se trouvent ainsi intensément chauffés. Notre laboratoire contribue à la mise au point de ce faisceau en réalisant des recherches fondamentales sur les interactions entre les atomes qui le constituent et les parois de « l'injecteur de neutres », en vue d'optimiser les propriétés. ●



#### Soleil

Le soleil est le siège permanent de réactions de fusion nucléaire.



#### contributeurs

**Bruno Lepetit, Didier Lemoine**  
**Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité**  
Unité mixte de recherche 5589  
CNRS/Université Toulouse III



#### ITER, une collaboration internationale

La première pierre du prototype de réacteur de fusion, ITER, a été posée à Cadarache en 2010. Ce réacteur dédié à la recherche a pour objectif de franchir plusieurs verrous technologiques. Il fonctionnera pendant 20 ans à partir de 2020.



Une température de 150 000 000° C, soit dix fois plus élevée qu'au cœur du soleil



# Ressources naturelles EN HYDROGÈNE



## contributeurs

Valérie Chavagnac, Adélie Delacour  
Laboratoire Géosciences  
Environnement Toulouse  
Unité mixte de recherche 5563  
CNRS/Université Toulouse III/IRD/CNES



L'hydrogène ( $H_2$ ) est un des candidats potentiels au remplacement des énergies fossiles dont les réserves s'amenuisent. L'hydrogène brûle aisément avec l'oxygène en dégageant des quantités considérables d'énergie (3 fois la teneur

énergétique de l'essence) et sans émettre de gaz à effet de serre. L'hydrogène ouvre donc les portes à une production d'énergie réellement durable, mais rendre son exploitation efficace et bon marché reste un défi.

## PERMETTRE UNE EXPLOITATION RENTABLE

Dans le milieu naturel, l'hydrogène est produit au cours de l'interaction entre l'eau de mer et/ou l'eau météorique et les minéraux ferromagnésiens de la croûte océanique. Ce processus, appelé serpentinisation, entraîne la modification de la composition de la roche et de l'eau de mer. L'eau de mer est transformée en fluide hydrothermal riche en hydrogène, analogue des sources thermales en domaine continental. Certains systèmes hydrothermaux océaniques émettent des fluides dont la proportion d'hydrogène atteint 40 % des

La combustion de l'hydrogène dégage des quantités considérables d'énergie sans émettre de gaz à effet de serre. Mais une exploitation efficace et économiquement rentable des ressources naturelles reste encore un défi.



[↑](#) **Fumeur noir** sur le site hydrothermal de Lucky Strike (Dorsale atlantique). © Victor6000 (Ifremer/CNRS)



[↑](#) **Source hydrothermale** riche en hydrogène dans les roches de manteau (Sultanat d'Oman). © Valérie Chavagnac

gaz dissous correspondant à un flux d'hydrogène de 8 grammes par seconde. Néanmoins, pour permettre une exploitation de l'hydrogène économiquement rentable, il faut élucider les mécanismes à l'origine de sa production et évaluer la fréquence de ce phénomène en milieu naturel. Ceci se fait d'abord grâce à une observation méticuleuse des systèmes hydrothermaux en milieu naturel marin ou continental. La sortie de ces fluides (35 à 340°C) très riches en hydrogène dans l'environnement étant identifiée, l'analyse de leur composition chimique en

laboratoire permet de mieux comprendre la trajectoire de percolation de l'eau dans la roche en termes de pression et de température. Parallèlement, les réactions de serpentinisation sont étudiées grâce à l'observation des assemblages minéralogiques au microscope. Une deuxième étape consiste à sonder les fonds océaniques afin de repérer et répertorier ces systèmes hydrothermaux riches en hydrogène. Ceci sera possible dès que des capteurs chimiques permettront de mesurer *in situ* les concentrations en hydrogène dans le milieu. ●

# LE STOCKAGE RÉVERSIBLE DE L'HYDROGÈNE.

## Pourquoi et comment ?

La filière de l'hydrogène comme vecteur d'énergie est promise à un bel avenir si nous apprenons à domestiquer cette molécule.

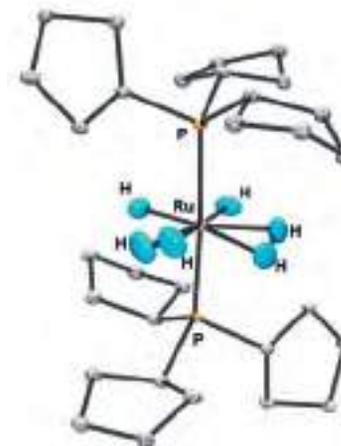
L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'univers. Sur terre, on le retrouve principalement dans les océans sous forme de molécules d'eau (H<sub>2</sub>O). Il est de fait bien plus abondant que ne peuvent l'être toutes les énergies fossiles. Associé à lui-même, il forme le dihydrogène (H<sub>2</sub>) qui est un gaz (communément appelé hydrogène) dont la réaction de combustion avec le dioxygène (O<sub>2</sub>) de l'air produit de l'énergie et de l'eau comme seul sous-produit de réaction. Inversement, la décomposition de l'eau produit de l'hydrogène et de l'oxygène. Par contraste, les hydrocarbures sont des contributeurs nets de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), un des responsables du réchauffement climatique. C'est tout l'intérêt de développer une filière efficace de l'hydrogène pour pourvoir à nos besoins énergétiques croissants. Domestiquer le dihydrogène, c'est entre autres savoir le produire facilement et de manière non-polluante à partir de l'eau. C'est maîtriser sa combustion et en cap-

ter le plus efficacement possible l'énergie produite proprement. C'est faire en sorte que son utilisation soit suffisamment souple pour permettre de répondre en temps réel à un besoin d'énergie donné.

### DES MODÈLES POUR LE STOCKAGE

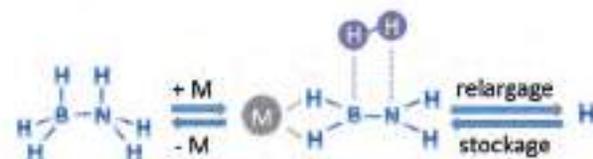
La chimie peut apporter des solutions à la fois pour le stockage et la production de dihydrogène, comme dans le cas des hydrures métalliques (molécules contenant des liaisons métal-hydrogène). Des recherches portent sur l'utilisation de composés de métaux de transition habillés à la fois d'atomes d'hydrogène et de molécules de dihydrogène. De tels composés permettent, par exemple, de contrôler la libération de dihydrogène de l'ammonia-borane, réservoir moléculaire comportant près de 20 % en masse d'hydrogène. Ces études fournissent des informations-clés sur le stockage et la libération de dihydrogène. À terme, ces travaux permettront d'élaborer et de contrôler des processus réversibles dans un souci de production d'énergie renouvelable. ●

**contributeurs**  
Gilles Alcaraz, Mary Grellier,  
Sylviane Sabo-Etienne  
Laboratoire de Chimie de Coordination  
Unité propre de recherche 8241 CNRS



↑  
**Métaux de transition**  
Complexe métallique fixant à la fois H et H<sub>2</sub>.

↓  
**Stockage** L'ammonia-borane permet de stocker et de relarguer H<sub>2</sub>.





# LES BIOFILMS MICROBIENS s'attaquent au marché de la production renouvelable d'hydrogène



## contributeurs

Alain Bergel, Benjamin Erable  
Laboratoire de Génie Chimique  
Unité mixte de recherche 5503  
INPT/CNRS/Université Toulouse III

**Le dihydrogène (H<sub>2</sub>) pourrait constituer un vecteur énergétique majeur à l'avenir, notamment pour la motorisation, car il a l'un des meilleurs rendements explosifs et sa combustion forme de l'eau.**



L'électrolyse est un processus de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. Elle est utilisée dans divers procédés industriels, tels que la production de dihydrogène par électrolyse de l'eau. Les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire ou éolienne,

produisent de l'électricité de façon intermittente. L'électrolyse de l'eau serait un moyen de stocker cette énergie en produisant de l'hydrogène, mais les électrolyseurs traditionnels sont très gourmands en énergie électrique. Les électrolyseurs microbiens remplacent l'électrolyse de l'eau par l'électrolyse de composés organiques. Seule une très faible partie de l'énergie nécessaire à l'électrolyse est fournie sous forme électrique, la plus grande partie provient de l'énergie chimique contenue dans le composé électrolysé lui-même. C'est un procédé de production de dihydrogène plus économe en énergie que l'électrolyse conventionnelle de l'eau.

Le concept de « catalyse électro-microbienne » a été découvert en 2002 par des chercheurs observant que des biofilms microbiens qui se développent naturellement à la surface d'une électrode sont capables de catalyser des réactions électrochimiques. Très vite, cette nouvelle forme de catalyse a donné naissance à de nouveaux procédés associant électrochimie et micro-organismes pour la production d'énergie, l'électro-synthèse, la dépollution des milieux naturels ou le traitement des effluents.

## UNE TECHNOLOGIE PROMETTEUSE

Dans un électrolyseur microbien, la substitution de l'oxydation électrochimique de l'eau par l'oxydation biocatalysée de composés organiques permet une réduction drastique de la tension nécessaire à l'électrolyse. Alors que pour une électrolyse classique, il faut imposer des tensions minimales supé-

↳  
**Électrolyse**  
L'électrolyse microbienne est possible à partir de tensions aussi faibles que 0,2 Volts.



rieures à 1,23 Volts, l'électrolyse microbienne devient possible à partir de tensions aussi faibles que 0,2 Volts, ce qui représente une économie de l'ordre de 80 % de l'énergie électrique consommée. Vu les productions d'hydrogène déjà obtenues en laboratoire, la technologie semble extrêmement prometteuse. ●

# PILES À COMBUSTIBLES : le courant passe !

Les piles microbiennes permettent la production d'électricité à partir de matière organique non valorisée.

**U**ne pile à combustible est un générateur électrochimique d'énergie permettant de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène, hydrocarbures, alcools,...) en énergie électrique sans passer par l'énergie thermique. Elle est constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte. À l'inverse d'un électrolyseur, l'alimentation en combustible génère l'apparition d'une tension électrique entre les deux électrodes : le dispositif devient un générateur électrique qui fonctionne aussi longtemps qu'il est alimenté. La catalyse électro-microbienne trouve un champ d'application privilégié avec la conception de piles à combustibles microbiennes.

## L'ÉMERGENCE D'UNE FILIÈRE

Dans ce type de piles, c'est la matière organique qui joue le rôle de combustible. Sa dégradation par les microbes produit de l'électricité. Les biofilms microbiens qui coloni-

sent l'anode des piles microbiennes utilisent toutes sortes de matières organiques comme combustible : lait, glucose, mélasses, eaux de stations d'épuration, déchets agricoles (laiteries, lisiers), déchets domestiques (compostage) et tous types de substrats carbonés fermentescibles.

C'est en fait toute une filière de production d'énergie électrique qui est en émergence, permettant l'exploitation de combustibles de très faible coût, voire de déchets non valorisés à ce jour, indépendamment des aléas climatiques (contrairement aux capteurs photovoltaïques ou aux éoliennes par exemple). Les piles microbiennes devraient s'imposer comme une technique idéale de production d'électricité dans les lieux éloignés des réseaux de distribution (habitats isolés, pays en voie de développement, plates-formes off shore, alimentation de capteurs, de balises...). Des niches innovantes sont à imaginer, comme les systèmes domestiques pour la maison autonome en énergie, et à long terme la production massive d'énergie n'est pas à écarter. ●



### contributeurs

Alain Bergel, Benjamin Erable  
Laboratoire de Génie Chimique  
Unité mixte de recherche 5503  
INPT/CNRS/Université Toulouse III



### Pile à combustible microbienne

Elle permet de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique.

“ Une filière qui permet l'exploitation de combustibles de très faible coût.



# Modélisation de transfert de **FLUIDES**

Pour palier les sources d'énergie productrices de gaz à effet de serre, la recherche se tourne vers les piles à combustible à membrane échangeuse de protons.

**E**

n France, le secteur des transports est une des sources majeures de gaz à effet de serre. Pour réduire ces émissions, le couplage entre une source d'énergie primaire non productrice de GES pour la production d'hydrogène et

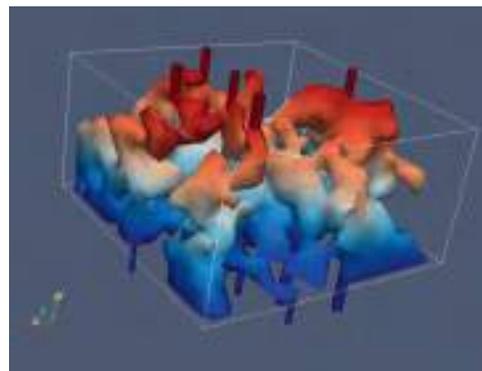
de piles à combustible hydrogène pour la production d'énergie électrique, apparaît comme une alternative aux moteurs thermiques. Mais le développement de cette nouvelle technologie nécessite d'améliorer les performances des systèmes.

Aujourd'hui, la gestion de l'eau produite conjointement à l'énergie électrique reste un facteur limitant le fonctionnement et la durée de vie de la pile. La gestion des transferts fluidiques (liquide et gaz) au cœur de pile est le prochain enjeu pour le développement industriel de la filière. Ces transferts sont contrôlés par les propriétés des différentes couches constitutives de la pile, parmi lesquelles la couche de diffusion joue un rôle essentiel.

## PROCHAIN ENJEU INDUSTRIEL

Nos recherches portent sur la modélisation et la simulation numérique des transferts d'eau dans les couches poreuses de

la pile. En effet, si l'eau liquide pénètre par un grand nombre de points d'entrée (les 32 tubes bleus sur la figure), il apparaît qu'elle ne ressort que par quelques points de sortie (les 5 tubes rouges). Ces mécanismes de coalescence permettent d'évacuer l'eau tout en laissant une grande partie du milieu poreux libre d'accès pour les gaz, ce qui est crucial pour le fonctionnement des piles. La difficulté principale de cette modélisation réside dans le fait que la taille moyenne des pores et l'épaisseur de la couche poreuse sont de dimension voisine, ce qui rend les approches classiques de calcul inopérantes. ●



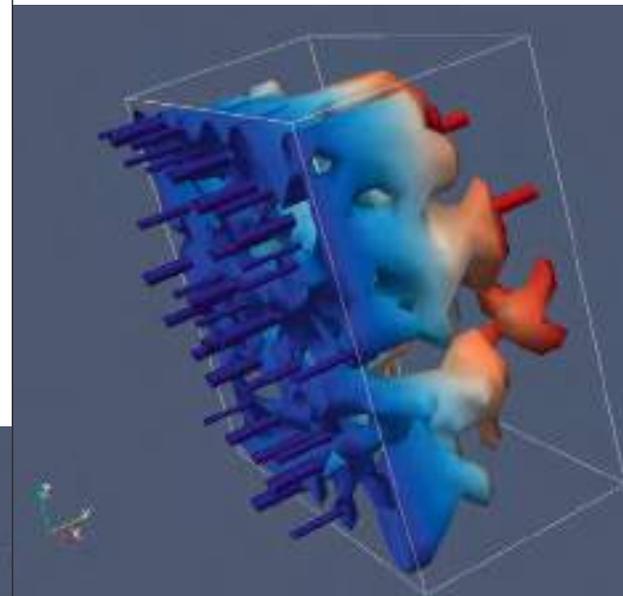
**contributeur**

Marc Prat

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

Unité mixte de recherche 5502

Université Toulouse III/CNRS /INPT



**Modélisation de transfert de fluides**

Visualisation de l'interface liquide-gaz au sein d'une couche poreuse hydrophobe obtenue par simulation sur réseau de pores.

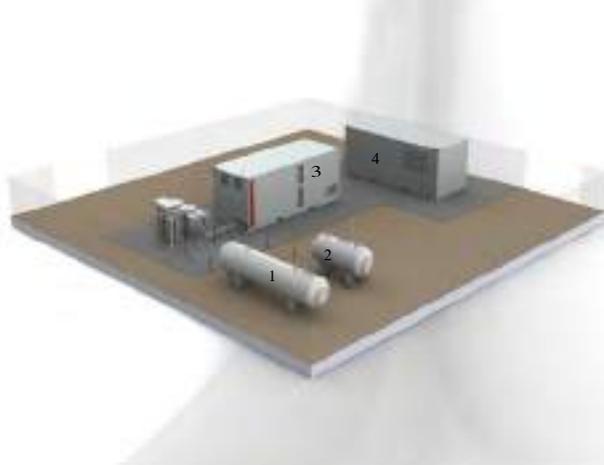
# Vers le déploiement de **SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES À HYDROGÈNE**



## contributeurs

Christophe Turpin, Stéphan Astier  
Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie  
Unité mixte de recherche 5213  
CNRS/INPT/ Université Toulouse III

**Le stockage des énergies renouvelables, via le vecteur énergétique hydrogène, permet à un moment opportun, de re-fabriquer de l'électricité à partir des gaz stockés, via une pile à combustible.**



### Vue d'ensemble de la batterie $H_2/O_2$

Stockage sous pression de l'hydrogène (1) et de l'oxygène (2), container avec le tandem électrolyseur/pile à combustible et le réservoir d'eau (3), container avec l'interface électrique et la supervision du procédé (4).



Si la faisabilité des applications des piles à combustible n'est pas plus à démontrer, l'amélioration de leur durée de vie et la diminution de leur coût restent des priorités de la recherche. Malgré tout, une certaine maturité a déjà été atteinte comme le prouve leur industrialisation naissante au Japon et, dans une moindre mesure, en Allemagne, aux États-Unis et au Canada. Depuis une douzaine d'années, nos recherches sont ainsi consacrées au développement de systèmes énergétiques à hydrogène, tant au niveau de leur conception que de leur utilisation. En effet, on peut optimiser leurs performances en les associant à d'autres composants, comme des batteries ou des supercondensateurs aux propriétés énergétiques complémentaires, pour réaliser des générateurs électriques à haute performance. De telles associations visent à éviter un surdimensionnement de la pile à combustible, à maximiser sa durée de vie, à minimiser l'en-

combrement et la masse du système... Ce savoir-faire en termes de systèmes hybrides à pile à combustible a été développé dans le cadre d'applications aéronautiques avec *Airbus* depuis 2005.

## TRANSFORMER UN EXCÉDENT DE PRODUCTION RENOUVELABLE

Nos recherches portent également sur le stockage des énergies renouvelables, par nature intermittentes, via le vecteur énergétique hydrogène. La stratégie consiste à transformer un excédent de production renouvelable en hydrogène ( $H_2$ ) et oxygène ( $O_2$ ) via un électrolyseur d'eau (stockage d'électricité) et, à un moment opportun, de re-fabriquer de l'électricité (déstockage) à partir des gaz stockés via une pile à combustible : on parle de « batterie  $H_2/O_2$  ». Très récemment, nous avons ainsi participé à un projet piloté par la société française *Helion Hydrogen Power*, visant à alimenter en permanence un site isolé à partir de générateurs photovoltaïques associés à une batterie  $H_2/O_2$ .



# CONSOMMER MOINS

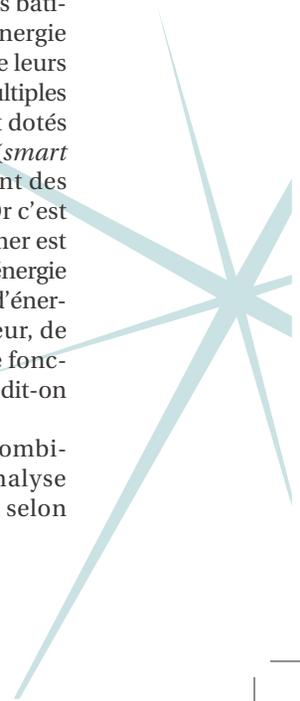
Nos sociétés attendent beaucoup des solutions technologiques pour diminuer les consommations d'énergie. C'est oublier l'impact du facteur humain.



Le projet de transition énergétique repose sur l'idée centrale que la technique est porteuse des solutions qui permettront à nos sociétés de surmonter la difficulté à produire de l'énergie. Ce sont

donc des solutions technologiques qui sont actuellement préconisées comme dans le bâtiment : afin de diminuer par quatre les consommations d'énergie, la réglementation impose désormais de construire des bâtiments basse consommation ou à énergie positive. En retour il est attendu que leurs occupants, au même titre que les multiples équipements intelligents dont sont dotés leurs logements ou leurs bureaux (*smart grids, smart meters...*), développent des comportements dits intelligents. Or c'est oublier combien l'acte de consommer est complexe et combien économiser l'énergie ne va pas de soi. Le consommateur d'énergie est avant tout un consommateur, de biens, de services, de bien-être, de fonctions, de symboles, de valeurs... Ne dit-on pas « *consommer c'est exister* » ?

Il semble alors fondamental de combiner l'analyse technique à une analyse plus sociologique pour raisonner selon



MIEUX CONSOMMER



# MIEUX CONSOMMER

# D'ÉNERGIE, OU MIEUX LA CONSOMMER ?

## Vers un « smart consommateur »

une approche de type sociotechnique. En effet, on constate trop souvent que si les technologies (qu'elles soient énergétiques ou pas) fonctionnent bien en laboratoire, il en va souvent tout autrement lorsqu'on les confronte à des utilisateurs. Par exemple si, sur le papier, les bâtiments de type BBC ou BEPOS consomment peu ou pas d'énergie, ils voient leurs performances parfois perturbées dès qu'ils sont occupés. On retrouve ce constat dans la difficulté récurrente à laquelle les consommateurs sont confrontés : ils sont de mieux en mieux sensibilisés aux enjeux de moins gaspiller l'énergie, ils peuvent bénéficier de mesures publiques incitatives (défiscalisation, primes, subventions...) et les appareils et les équipements énergétiques sont de plus en plus performants. Or, malgré ce contexte plutôt favorable, malgré les multiples signaux à consommer avec plus de sobriété, on observe une faible maîtrise des consommations, voire des effets rebonds (hausse des consommations).

“ On observe une faible maîtrise des consommations, malgré les multiples incitations

Comment y remédier ? Comment faire en sorte que les technologies puissent être appropriées et utilisées dans un sens plus favorable aux économies escomptées ? En appréhendant l'énergie comme un système sociotechnique qui renvoie à une combinaison d'éléments en interaction et en interdépendance : des acteurs humains (décideurs, concepteurs, utilisateurs... avec leurs propriétés sociales, leurs croyances et leurs routines), des techniques (considérées alors comme des acteurs non humains), des dynamiques sociales (des cycles de vie, des jeux de réseaux, des processus d'apprentissage, des flux d'informations...), des environnements (climatique, énergétique, politique...) et des configurations (organisationnelles, institutionnelles, familiales...).

### TECHNIQUE ET SOCIÉTÉ : ATTENTION AUX UTOPIES TECHNOLOGIQUES

Les technologies n'opèrent pas par la magie. Elles renvoient aussi à des systèmes socio-



#### contributeurs

Christophe Beslay, Marie-Christine Zélem  
Centre d'Étude et de Recherche Travail,  
Organisations, Pouvoirs

Unité mixte de recherche 5044

Université Toulouse II/CNRS/Université Toulouse III

techniques complexes et fragiles. Elles supposent des conditions de production exigeantes, coûteuses et incertaines. Elles passent par des phases d'expérimentation, d'ajustement, de détournement. Leur mise en œuvre est parfois mal maîtrisée lorsque les référentiels de formation ne sont pas révisés et les savoir-faire pas en adéquation. Leur mise sur le marché n'est pas automatique et peut rencontrer nombre d'obstacles. Elles sont porteuses de logiques qui ne sont pas toujours compatibles avec les logiques sociales. Elles reposent sur des conceptions standardisées de l'usage, du confort, qui renvoient à des normes techniques (comme celle du 19°C dans les bâtiments) qui tendent à s'imposer comme des normes sociales. Souvent, elles mettent les usagers à l'écart par la multiplication des automatismes, la programmation, les équipements intelligents. Leurs conditions d'utilisation supposent des compétences que leurs utilisateurs n'ont pas toujours et qu'il s'agit de développer. ●

# ÉCLAIRAGE : la révolution « O-LED » en marche



## contributeurs

Lydie Arexis Boisson, Georges Zissis,  
Laurent Canale  
Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie  
Unité mixte de recherche 5213  
Université Toulouse III/CNRS/INPT

33

milliards d'ampoules électriques sont en fonctionnement sur Terre. 20 milliards sont produites annuellement et à elles seules, elles consomment près de 20 % de la production mondiale d'électricité. À cela s'ajoute chaque année l'émission de 1900 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, directement liées à la production d'énergie utilisée pour l'éclairage, qui contribuent à l'effet de serre.

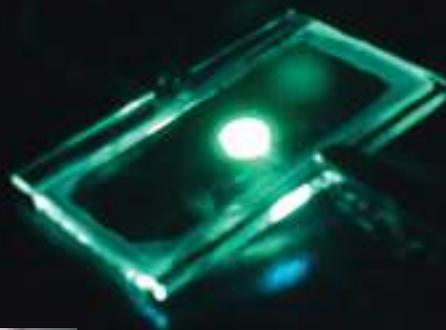
Avec l'accroissement de la population mondiale et l'augmentation du niveau de vie, la consommation énergétique destinée à l'éclairage pourrait doubler en 20 ans. Nous devons donc nous résoudre à proscrire les lampes énergivores et nous tourner vers un éclairage raisonné. En effet, lorsqu'on allume une lampe à incandescence classique, seulement 3 % de l'énergie consommée est convertie en lumière et tout le reste est perdu en chaleur.

Nous vivons actuellement une révolution technologique qui transforme nos habitudes de consommation. Les lampes « LED »

Les ampoules du futur (O-LED) pourront épouser la forme de n'importe quelle surface, se transformer en miroir et afficher des informations...



Production en laboratoire  
Unité de production des prototypes O-LED.



Diodes Électro-Luminescentes organiques(O-LED)  
O-LED verte en fonctionnement.

(Diodes Electro-Luminescentes), les lampes fluo-compactes, et bientôt les lampes « O-LED » (Diodes Electro-Luminescentes Organiques) seront notre quotidien. Ces nouvelles sources de lumière ont en commun une durée de vie multipliée par 10 et une efficacité énergétique multipliée par 5. Les recherches actuelles sur les O-LED, des feuilles de plastique qui émettent de la lumière sous l'effet d'une tension électrique, sont particulièrement actives. Une

O-LED se présente sous forme d'une structure relativement simple : une superposition de couches de matériaux organiques pris en sandwich entre deux électrodes, l'une transparente et l'autre métallique. Imaginez une feuille plastique, légère et transparente, qui pourra épouser la forme de n'importe quelle surface, pouvant émettre une lumière douce, colorée ou non, et pouvant se transformer en miroir ou afficher des informations : nul doute que les O-LED constitueront la prochaine grande avancée du domaine de l'éclairage dans les dix prochaines années. ●

# RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE AMBIANTE

## pour l'alimentation des objets communicants connectés sans fil

Une électronique adaptée renforce l'autonomie énergétique des objets de notre quotidien. Un champ d'applications presque illimité



Les objets intelligents connectés sans fil font aujourd'hui partie de notre quotidien. Ces objets sont confrontés au problème de leur autonomie énergétique : changement de pile, recharge périodique de la batterie... Seule

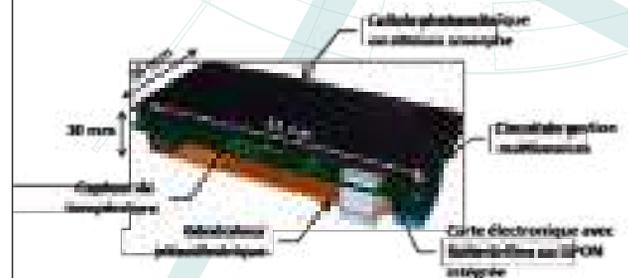
une production et un stockage d'énergie électrique localement au niveau de l'objet pourront, à terme, permettre d'assurer un fonctionnement totalement transparent pour l'utilisateur. On parle de « récupération d'énergie ambiante ».

Il s'agit d'exploiter des effets physiques bien connus, et déjà mis en œuvre dans les applications capteur (piézoélectricité, effet Seebeck, effet photovoltaïque, induction électromagnétique...), pour produire de l'énergie électrique. L'idée n'est pas nouvelle. En effet déjà dans les années 80-90 un grand nombre de petits dispositifs électroniques (montres, calculatrices...) fonctionnaient déjà sur ce principe en s'alimentant grâce à l'éner-

gie fournie par une petite cellule photovoltaïque. Depuis le début des années 2000 plusieurs équipes de recherche dans le monde ont conçu des solutions capables de produire de l'énergie électrique à partir de différences de température, de l'énergie mécanique des vibrations, ou encore des émissions électromagnétiques présentes dans l'environnement (RFID, GSM, Wifi...).

### UNE ÉLECTRONIQUE ADAPTÉE

C'est dans ce contexte que nous avons développé une électronique adaptée capable de rendre exploitable l'énergie électrique récupérée par ces dispositifs en combinant leur utilisation avec une batterie fine au lithium de type LiPON. Grâce à une longue durée de vie, une très faible autodécharge, une bonne densité de puissance et d'énergie, c'est le candidat idéal pour les applications visées : l'habitat intelligent, le contrôle de santé des structures mécaniques (bâtiment, pont, avion...), la surveillance des réseaux de



**contributeur**

Carole Rossi

Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes

Unité propre de recherche 8001 CNRS

transport et de distribution (électricité, eau, données, transport ferroviaire, urbain, aérien...), la grande distribution et la gestion de la chaîne logistique, pour ne citer que les exemples les plus économiquement porteurs. ●



# UNE SEMELLE AUTONOME ÉNERGÉTIQUEMENT

## pour le suivi de l'état de santé des personnes âgées.



### contributeur

Eric Campo  
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture  
des Systèmes  
Unité propre de recherche 8001 CNRS



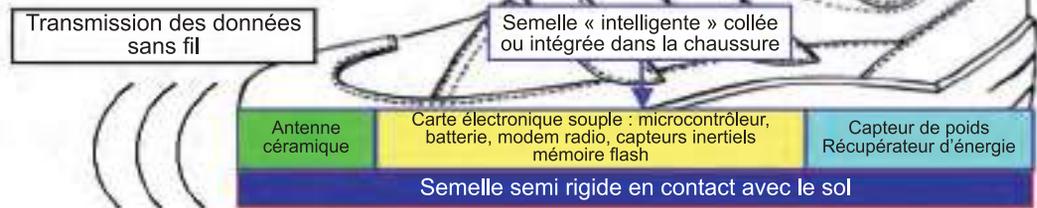
Les possibilités offertes par les micro-systèmes embarqués permettent aujourd'hui d'envisager des solutions intéressantes, performantes et à coût réduit pour le suivi de l'état de santé de personnes âgées. Nous étudions

en particulier la possibilité qu'offrent les micro-systèmes pour un suivi précis des activités de marche et la mesure du poids en ambulateur.

### UNE SEMELLE INTELLIGENTE

Ces systèmes, petits et légers, évitent les interférences avec les mouvements de la personne, ce qui en facilite l'utilisation dans n'importe quel environnement et dans des conditions de marche naturelle. Avec les moyens de la télémédecine, toutes ces données sont à la disposition du clinicien, à distance ou en consultation, pour l'aide au diagnostic. Le système combine toutes les fonctionnalités suivantes :

### Description de la semelle intelligente ↗



- Des capteurs inertiels pour la mesure des caractéristiques dynamiques de la marche, de la distance parcourue et de la vitesse de marche.
  - Un capteur de force/pression dans le talon de la semelle pour la mesure du poids.
  - Un microcontrôleur pour le prétraitement des données avec le calcul de la moyenne des paramètres physiologiques par période de marche au cours d'une journée.
  - Une mémoire de stockage des données.
  - Un module radio pour communiquer les données et l'identifiant de la personne vers un dispositif central de collecte.
- L'alimentation électrique de tous les com-

posants de cette semelle intelligente est assurée par un système de récupération piézoélectrique de l'énergie mécanique de la marche associé à une électronique de conversion pour le stockage dans une micro-batterie.

Après adaptation électrique, il est ainsi possible de récupérer une puissance moyenne de 10 mW environ lors d'une marche à 1 pas par seconde. Pour un usage permanent et sans intervention extérieure, il sera nécessaire d'intégrer ce récupérateur d'énergie, ce qui constitue la dernière difficulté à surmonter avant que cette semelle intelligente ne soit totalement opérationnelle. ●

# GESTION INTELLIGENTE DE L'ÉNERGIE

## via la communication directe entre machines

Des technologies intelligentes font communiquer les objets entre eux en minimisant l'intervention humaine et en réduisant la consommation énergétique.



Un domaine de recherche émergent développe et exploite la technologie des dispositifs intelligents et communicants (de type smartphones), des capteurs/actionneurs et des machines (domestiques ou industrielles) connectés sur

Internet. La recherche associe ces technologies à des nouvelles techniques inspirées du système nerveux qui minimisent l'intervention humaine dans la gestion d'un système. Les applications sont nombreuses dans le domaine de la télé-assistance (médicale) et de la télé-surveillance (gestion de flotte), de la télémétrie (compteurs intelligents : électricité, eau...) et de l'intelligence ambiante (commande de chauffage à distance), ou de la gestion de l'environnement (monitoring de la qualité de l'air, gestion de l'eau).

### DIMINUER LA CONSOMMATION

Un ensemble de scénarios montrant les capacités des méthodes et outils créés seront

simulés puis prochainement mis en place : surveillance de la consommation énergétique afin de détecter des événements anormaux et d'y réagir automatiquement ; prise en compte des habitudes des personnes, de leur localisation, des mesures et d'éventuelles prédictions pour anticiper et gérer au plus juste l'énergie ; prise en compte du planning de rendez-vous, de l'ensoleillement, du prix de l'énergie à une heure donnée, de la production locale par les panneaux photovoltaïques pour piloter le chauffage ou la climatisation ; gestion de la luminosité naturelle et artificielle en fonction du profil de la personne présente.

### AIDER LES FOURNISSEURS D'ÉNERGIE

Les multiples applications de ces activités de recherche sont autant de moyens de diminuer la consommation d'énergie d'une maison, que d'aider les fournisseurs d'énergie à mieux gérer leur production, ou bien de permettre à chacun de réduire la facture en profitant des variations de tarif et de sa propre production d'énergie. ●



### contributeurs

Thierry Monteil, Mahdi Ben Alaya, Khalil Drira  
Laboratoire d'Analyse  
et d'Architecture des Systèmes  
Unité propre de recherche 8001 CNRS



### La communication directe

« machine to machine » est l'un des volets du projet ADREAM développé en laboratoire.



# SUPRACONDUCTEURS pour le transport de l'énergie



## contributeur

Baptiste Vignolle  
Laboratoire National des Champs  
Magnétiques Intenses de Toulouse  
Unité propre de recherche 3228 CNRS

**25 % de l'électricité transportée par des câbles conventionnels en cuivre est perdue sous forme de chaleur avant d'arriver jusqu'à vous. Des matériaux supraconducteurs pourraient éviter ces pertes...**



Les supraconducteurs ont en effet l'incroyable propriété de transporter le courant sans aucune perte. Ces matériaux, découverts il y a 100 ans, sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne (appareils IRM, réseaux de

téléphonie mobile, câbles supraconducteurs pour le transport massif d'électricité...) et permettent déjà de réduire fortement notre facture électrique dans les secteurs où ceux-ci sont employés. Dans le domaine

### ↳ Champs magnétiques

Aimants en lévitation au-dessus d'une pastille supraconductrice refroidie à -200°C par de l'azote liquide.  
© CNRS Photothèque/  
Broffroff Julien/LPS

de la recherche, les supraconducteurs sont massivement employés pour produire de très forts champs magnétiques, le plus gros consommateur de supraconducteur étant le CERN à Genève, avec son immense accélérateur de particules. Des prototypes permettant de stocker de l'énergie sont également à l'étude et un train à lévitation supraconductrice nommé MAGLEV est opérationnel au Japon, per-

mettant de transporter des passagers à très grande vitesse (580 km/h) avec sobriété énergétique. Cependant, le développement d'applications encore plus nombreuses et à plus grande échelle est freiné par la très basse température (-200° C) requise pour que ces composés dévoilent leurs fascinantes propriétés.

### CONNAÎTRE LES SUPRACONDUCTEURS

De plus le mécanisme microscopique donnant naissance à la supraconductivité est encore mal compris par la communauté scientifique. Les chercheurs étudient donc ces composés à l'aide d'un très fort champ magnétique produit au laboratoire. Cette recherche fondamentale consiste à utiliser le champ magnétique pour détruire la supraconductivité à basse température et ainsi mieux comprendre l'état qui lui donne naissance. S'agit-il d'un métal ? Ou bien d'un isolant ? La réponse à ces questions centrales améliore notre compréhension des supraconducteurs actuels et devrait contribuer à en concevoir de plus performants, fonctionnant à température ambiante. ●

# LE NITRURE DE GALLIUM : un matériau d'avenir pour l'électronique de puissance

Une meilleure gestion et conversion de l'énergie électrique nécessite de nouveaux matériaux tels que le nitrure de gallium.

**L**e domaine de l'énergie représente un axe de développement majeur du XXI<sup>e</sup> siècle autour duquel se focalisent de nombreuses recherches. La baisse inéluctable des ressources en énergies fossiles et une plus grande prise en considération des conséquences des émissions de gaz à effet de serre sur le climat et la pollution, induisent dans le monde un effort important pour développer la production d'énergies alternatives et réduire la consommation énergétique par les utilisateurs. Les évolutions de ce secteur vont en outre nécessiter une gestion plus performante des ressources, du stockage et de l'utilisation de l'énergie.

## AMÉLIORER LES PERFORMANCES

Dans ce contexte de généralisation de solutions électriques, support d'un développement durable, la conception de nouveaux composants et systèmes intégrés de puissance qui doivent gérer cette énergie est indispensable pour assurer une meilleure gestion et conversion de l'énergie électrique



en améliorant les performances (tension, courant, température, fréquence, pertes,...) des composants et systèmes de puissance. Une avancée majeure peut venir du remplacement du silicium par un semi-conducteur comme le nitrure de gallium (GaN) dont les propriétés physiques très supérieures au silicium lui permettent de surmonter les limitations de ce dernier. De par ses propriétés, le GaN devrait permettre la concep-

 **contributeur**  
Frédéric Morancho  
Laboratoire d'Analyse  
et d'Architecture des Systèmes  
Unité propre de recherche 8001 CNRS

 **Composant**  
Photographie d'un composant électronique de puissance GaN conçu sur un substrat silicium 150 mm.

tion de composants haute tension subissant moins de pertes, travaillant à des fréquences beaucoup plus élevées, et à des températures plus élevées que des structures similaires en silicium. En collabora-

tion avec des acteurs académiques et industriels du monde de la microélectronique de puissance, nous travaillons ainsi sur la conception, fabrication, caractérisation et modélisation de composants et systèmes de puissance en GaN, ce matériau qui permet de répondre aux quatre difficultés des systèmes énergétiques que sont le refroidissement, le poids, l'encombrement et le rendement. ●



# OPTIMISER LA CONCEPTION SYSTÈME et hybrider pour mieux gérer l'énergie et préserver l'environnement



## contributeurs

Xavier Roboam, Bruno Sareni  
Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie  
Unité mixte de recherche 5213  
Université Toulouse III/CNRS/INPT

**La locomotive hybride PLATHEE montre comment la combinaison des nouvelles technologies de stockage et des sources principales d'énergie permet de diminuer consommation et rejets de CO<sub>2</sub> via une gestion de l'énergie et un dimensionnement optimisés.**



Qu'il s'agisse de systèmes mobiles ou stationnaires, la consommation et la production de puissance électrique sont souvent intermittentes et doivent être mises en cohérence au travers d'une gestion énergétique dédiée.

L'architecture système et le dimensionnement doivent aussi faire partie intégrante de la conception systémique. Ces questions essentielles, intimement couplées à celle de la gestion, doivent être abordées de façon simultanée : l'optimisation multi-objectifs constitue ainsi une voie prometteuse pour économiser l'énergie.

## ÉCO-PERFORMANCE

La locomotive hybride PLATHEE (PLAteforme pour Trains Hybrides Économiques en Énergie et respectueux de l'environnement) de la SNCF est un excellent exemple ayant conduit les chercheurs à proposer des stratégies de gestion et un dimensionnement simultanément optimisés. La stratégie de gestion est de type fréquentielle, en ce sens qu'elle

place les différents composants de production (ici un groupe Diesel) et de stockage (accumulateurs électrochimiques et supercondensateurs) dans leur gamme de fréquence préférentielle. Via une procédure de filtrage de la puissance demandée, les supercondensateurs répondent aux besoins hautes fréquences de la mission de circulation tandis que le groupe Diesel fonctionne en permanence à un point de fonctionnement fixe, à rendement optimal, associé à une stratégie de « Marche & Arrêt ». La batterie assure quant à elle le tampon « moyenne fréquence » entre ces deux éléments. L'approche de conception intégrée par optimisation permet de dimensionner les différentes sources d'énergie au regard de critères d'« éco-performance ». Les résultats obtenus ont souligné les gains offerts par l'hybridation, tant sur le plan du coût global de possession que sur le coût climatique représenté par la consommation de gazole et les rejets en CO<sub>2</sub> au cours de l'exploitation de l'engin : la version hybridée optimisée engendre ainsi une réduction de l'ordre de 20 % sur ces deux critères par rapport à la solution « tout Diesel ». ●



**Combinaison de technologies de stockage et de production d'énergie.** En mauve, groupe Diesel, en bleu, accumulateurs, en vert électronique de puissance, en jaune batteries.

© SNCF

**La locomotive PLATHEE est un projet coordonné par la SNCF, dont les partenaires sont : ZHEnergy, IFSTTAR, Laplace, Socofer et Soprano.**

# CARBONES NANOPOREUX À HAUTE DENSITÉ D'ÉNERGIE

La réalisation de micro-supercondensateurs sur puce est en pleine expansion et permettra le développement de réseaux de capteurs sans fils.

# U

ne meilleure gestion de l'énergie passe par le développement de dispositifs de stockage plus efficaces. Parmi ces dispositifs, les supercondensateurs permettent la récupération d'énergie, comme l'énergie de freinage sur un véhicule,

mais souffrent encore d'une trop faible autonomie. Les recherches que nous menons se situent au niveau des matériaux d'électrode : la réalisation de carbones nanoporeux permet d'augmenter la densité de charges stockées bien au-delà de ce que prévoient les théories classiques. En effet, l'énergie est stockée par accumulation d'ions dans les pores de l'électrode. Ces pores sont nanométriques et confinent les ions au point de séparer les ions positifs des ions négatifs.

## DÉFIS TECHNOLOGIQUES

Il en résulte un doublement de la densité d'énergie, intéressant le domaine du transport et permettant également la mise au point de supercondensateurs micrométriques de haute densité d'énergie. Lorsque le carbone nanoporeux est déposé sur du silicium sous forme de film, la capacité

## Les systèmes électrochimiques de stockage d'énergie.

L'accumulateur stocke beaucoup d'énergie et la délivre sur plusieurs heures. Le condensateur délivre une très faible quantité d'énergie sur quelques millisecondes.

Le supercondensateur est intermédiaire, il permet de fournir de l'énergie pendant quelques secondes.

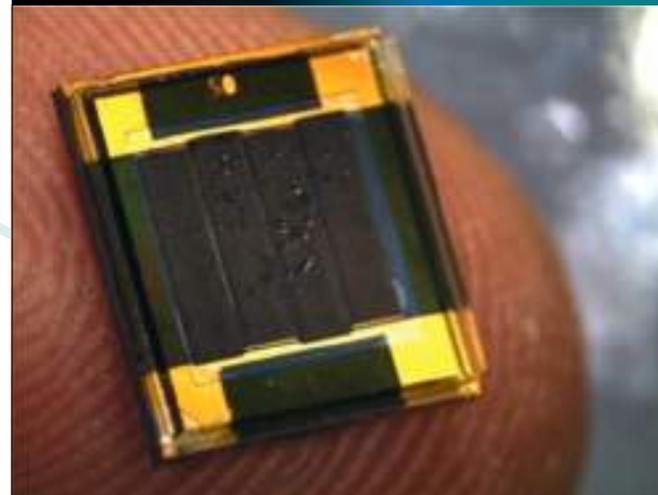
volumique de stockage de charges peut être multipliée par 4.

La réalisation de micro-supercondensateurs sur puce est un domaine en pleine expansion : intégrés dans les microsystèmes, ils permettront le développement de réseaux de capteurs sans fils. Les défis pour l'obtention de composants fonctionnels sont essentiellement d'ordre technologique, mais ces micro-supercondensateurs présentent des potentialités réelles pour être utilisés dans un proche futur en complément ou en remplacement des micro-batteries. ●



### contributeurs

Pierre-Louis Taberna, Patrice Simon  
Centre Interuniversitaire de Recherche  
et d'Ingénierie des Matériaux  
Unité mixte de recherche 5085  
Université Toulouse III/CNRS/INPT  
Magali Brunet, David Pech  
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture  
des Systèmes  
Unité propre de recherche 8001 CNRS



### Stockage électrochimique d'énergie

Micro-supercondensateur sur puce.



# LES CHIFFRES CLEFS DE L'ÉNERGIE EN MIDI-PYRÉNÉES

## source

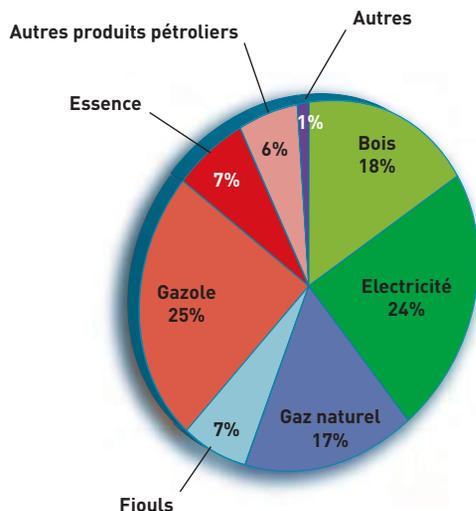
Observatoire Régional de  
L'Énergie Midi-Pyrénées (OREMIP)

## Bilan en Midi-Pyrénées (chiffres 2008)

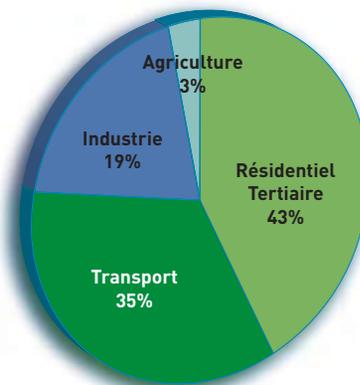
Production : 6,2 Mtep (Mégatonne équivalent pétrole)

Consommation : 6,1 Mtep (2,2 tep/habitant)

## Évolution 1990-2008 : +1 % par an des consommations



Répartition par énergie  
des consommations (2008)



Répartition sectorielle  
des consommations (2008)

## Résidentiel/tertiaire :

**+1,5 % par an.**

Cette croissance est imputable à un renforcement du gaz naturel et à une domination de l'électricité.

## Transport :

**+2,1 % par an.**

Le transport représente plus d'un tiers du bilan énergétique régional. L'augmentation des consommations de produits pétroliers entraîne non seulement une dépendance énergétique certaine mais également de fortes émissions de gaz à effet de serre.

## Industrie :

**-1,1 % par an.**

Une évolution en deux temps : la consommation d'énergie du secteur industriel après avoir connu une forte baisse jusqu'en 1995, s'est stabilisée ces dernières années. En 2001, la catastrophe d'AZF a entraîné une chute des consommations de gaz dans l'industrie midi-pyrénéenne.



## Les énergies renouvelables en Midi-Pyrénées

**Hydraulique** : Avec 72 grandes centrales et 604 petites installations, Midi-Pyrénées se place au second rang des régions françaises après Rhône-Alpes (ex æquo avec PACA).  
Puissance installée en hydroélectricité : 5,6 GW.

**Bois-énergie** : Dans le cadre du plan bois énergie mis en place en 2000, environ 97 chaudières automatiques ont été installées en Midi-Pyrénées (essentiellement dans l'industrie et dans le tertiaire).

**Énergie éolienne** : On compte en Midi-Pyrénées 123 éoliennes réparties sur trois départements. Elles représentent une puissance installée de 236 MW.

**Solaire thermique** : Avec plus de 14 719 chauffe-eau solaires individuels installés

dans le cadre du Plan Soleil, depuis 1999, Midi-Pyrénées se place en tête des régions de France.

**Photovoltaïque** : On compte en Midi-Pyrénées plus de 100 installations photovoltaïques en site isolé (données 2004) et 118 installations reliées en réseau (données 2006).

**Biocarburant** : l'usine de Bousens est la plus ancienne unité de France. Avec 38 000 tonnes de diester par an, sa production représente 1 % de la production nationale d'ester en 2008.

**Géothermie** : une partie de la ville de Blagnac est alimentée à partir d'un réseau de chaleur d'origine géothermique.

**Cogénération** (production de chaleur et d'électricité) : On compte 22 installations

en Midi-Pyrénées pour une puissance électrique installée de 495,6 MW en 2008. En 2003, le CNES de Toulouse a reçu le Trophée des technologies économes et propres pour sa centrale de trigénération (production d'électricité, de chaud et de froid).

**Incinération** : Midi-Pyrénées représente 6 % de la production énergétique nationale due à l'incinération des déchets ●

A SAVOIR

**LA PRODUCTION D'ÉNERGIE PRIMAIRE DE MIDI-PYRÉNÉES** est composée à 26 % d'énergies renouvelables (13 % d'hydroélectricité et 13 % de bois-énergie) et à 71 % d'électricité d'origine nucléaire (chiffres 2008).





DÉVELOPPER LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Les énergies renouvelables sont une des clefs pour relever le défi de la transition énergétique, mais les freins à leur développement sont encore nombreux.



### contributeurs

Christophe Beslay,  
Marie-Christine Zélem  
Centre d'étude et de recherche Travail,  
Organisations, Pouvoirs  
Unité mixte de recherche 5044 Université  
Toulouse II/CNRS/Université Toulouse III

# DÉVELOPPER LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

# LES ÉNERGIES RENOUVELABLES, les ressources de l'avenir

**L**e soleil, le vent, la géothermie, le bois... représentent des énergies mobilisables grâce à des systèmes qui ont fait l'objet de progrès techniques qui leur confèrent aujourd'hui fiabilité et performance. Ce sont des techno-

logies qui ont fait leur preuve et qui méritent qu'on s'y arrête. Ces Énergies Renouvelables (EnR) participent à l'autonomie énergétique des territoires, au développement économique local et à la création d'activités industrielles. Elles s'accompagnent de créations d'emplois et contribuent peu à l'effet de serre. Elles représentent un atout certain face aux impératifs de la transition énergétique. Pourtant, alors que les systèmes techniques sont performants, leur diffusion reste encore balbutiante. Deux raisons principales : l'absence d'une offre structurée de type « Énergies Renouvelables de France » et le poids d'une culture fossile et nucléaire largement dominante. Les EnR sont des énergies anciennes qui, remises au goût du jour, revêtent un caractère de modernité. Nommées par ailleurs

« énergies nouvelles », elles ont acquis une véritable notoriété. On en parle de plus en plus dans le cadre scolaire ; la presse les évoque en des termes toujours plus favorables ; dans les sondages, elles sont plébiscitées par le grand public qui n'hésite plus à y avoir recours. Pourtant elles sont souvent qualifiées d'expérimentales (au sens où elles doivent encore faire leurs preuves) par nombre de détracteurs.

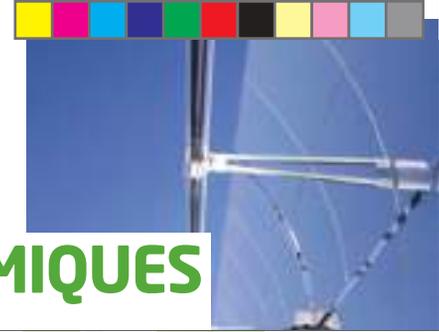
## EN MATIÈRE D'ÉNERGIE, LE CHOIX REPOSE SUR UN MONOPOLE

C'est notamment le cas pour l'éolien, ce qui freine considérablement son développement qui se réalise finalement au cas par cas, territoire par territoire. Elles supposent par ailleurs un certain nombre de démarches (dossiers, autorisations, répérage des professionnels, choix des technologies...) qui ajoutent une contrainte à leur adoption. Celle-ci peut alors être facilitée par les mesures incitatives mises en place par l'État ; ce qui est le cas pour le solaire, le photovoltaïque ou la biomasse ; mesures qui compensent l'investissement de départ qui peut s'avérer lourd comparé aux avan-

tages concrets et immédiats. Par ailleurs, l'énergie relève de l'expertise et du technologique. Elle est du domaine d'une magistrature technique. Or, en France, les choix en matière d'énergie, qui relèvent d'une culture de production d'électricité très centralisée, reposent essentiellement sur un monopole qui s'impose et conditionne les orientations en matière de politique. C'est ainsi que la mise en œuvre des politiques énergétiques se réalise selon une séquence linéaire, de manière descendante qui tend à freiner les velléités de certaines collectivités qui souhaiteraient s'engager vers une production d'énergie plus décentralisée dont les EnR sont la garantie.

Les problèmes ne sont pas d'ordre technique. Ils relèvent à la fois d'un processus de disqualification sur un marché concurrentiel et d'une réelle difficulté à construire une culture moins énergivore. Les EnR sont pourtant une des clefs pour relever le défi de la transition énergétique. Plus proches des territoires, plus accessibles, elles contribuent à faire des consommateurs des écocitoyens responsables vis-à-vis de leurs consommations domestiques. Combinées à des technologies intelligentes (régulateurs, compteurs de nouvelle génération...), elles peuvent les aider à développer une culture moins énergivore faisant des économies d'énergie une valeur. ●

“ Les énergies renouvelables doivent développer une culture moins énergivore ”



# LES CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES



## contributeur

Jean-Jacques Bézian  
Centre de recherche d'Albi en génie  
des procédés des solides divisés, de l'énergie  
et de l'environnement  
Unité mixte de recherche 5302 EMAC/CNRS

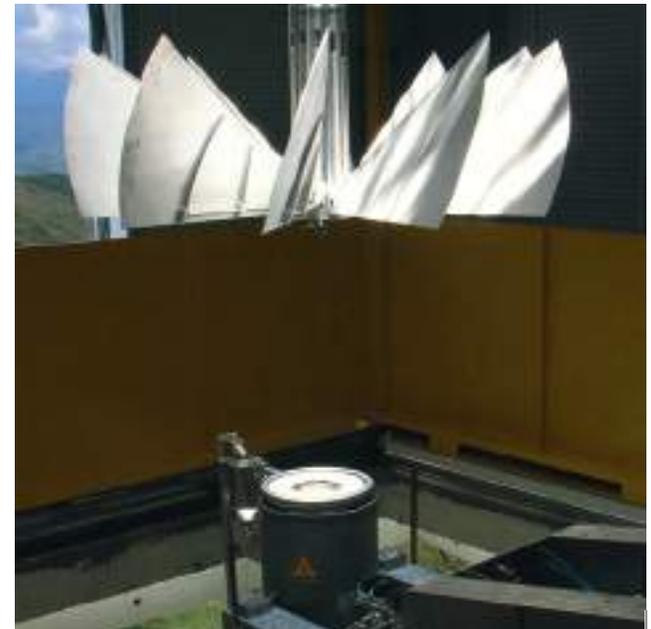
**Les ressources fossiles, à l'exception du charbon, sont de plus en plus rares, et ne seront bientôt plus suffisantes pour répondre à la demande croissante d'énergie au niveau mondial. La concentration de l'énergie solaire permet sa conversion en électricité, avec très peu de dégagement de gaz à effet de serre. Cette technologie autorise un stockage performant de l'énergie solaire collectée, et une production en phase avec la demande des réseaux.**

**L**es centrales solaires thermodynamiques sont des centrales thermiques de production d'électricité, pour lesquelles la source chaude est un collecteur d'énergie solaire. Cette technologie mature se développe rapidement dans les zones de la ceinture solaire (sud de l'Europe, Afrique du Nord, sud-ouest des Etats-Unis). Elle permet de décaler la production d'électricité par rapport à la ressource solaire, et d'augmenter le taux de pénétration des énergies renouvelables sur les réseaux. La plupart des centrales solaires sont actuellement basées sur des collecteurs cylindro-paraboliques. L'utilisation de récepteurs mobiles limite les températures de récupération à 400°C, et nécessite l'usage d'un fluide primaire liquide. Les performances avoisinent 15 % d'efficacité globale annuelle pour un coût d'investissement élevé. Les recherches menées actuellement suivent

deux orientations, la production de vapeur surchauffée (100 bars, 500°C) directement au foyer fixe des concentrateurs, et l'utilisation de cycles thermodynamiques combinant turbine à gaz et turbine à vapeur, avec de l'air sous pression à 1000°C. La première solution devrait être plus robuste, utiliser moins de surface au sol, pour des coûts plus faibles et des schémas hydrauliques simplifiés. Cependant, elle pose le problème du stockage de la vapeur surchauffée sous pression. La deuxième solution pose le problème du chauffage de l'air à plus de 1000°C. Elle demande des solutions innovantes, tant au niveau de l'architecture du récepteur que des matériaux qui le composent. De plus, augmenter les densités de flux solaires captés requiert une optimisation de l'optique de concentration, nécessairement ponctuelle. De nouveaux concepts, tant au niveau de l'optique que

des récepteurs, sont à l'étude avec des outils de calculs des transferts radiatifs basés sur les avancées des méthodes statistiques Monte Carlo. Ces travaux permettent d'envisager pour les centrales solaires du futur des efficacités globales annuelles supérieures à 30 %.

Un récepteur solaire volumique en essai au foyer d'un four solaire.



# ÉCOCONCEPTION DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

L'énergie d'origine photovoltaïque connaît une très forte croissance, mais la filière solaire doit, aujourd'hui, limiter l'impact écologique des installations.

L'énergie du rayonnement solaire est le seul apport extérieur au « système Terre ». Elle représente 8 000 fois la consommation de l'humanité pour une année. En Europe, l'électricité photovoltaïque a connu une très forte croissance depuis dix ans, passant de 16 à 25,5 GWc\* installés entre 2009 et 2010. Aujourd'hui, la filière solaire se doit de limiter l'impact écologique des installations photovoltaïques. Un premier pas concerne la conception et l'implantation de systèmes de panneaux solaires.

## CONCEPTION PAR OPTIMISATION

La conception de telles installations est encore actuellement surtout basée sur une approche technico-économique qui a comme objectif de maximiser la production d'énergie. Mais certains éléments tels que le niveau d'émissions globales, notamment en gaz à effet de serre, doivent être pris en compte. En fonction des technologies et de l'implantation des modules (fixes, inclinés, suiveurs, à différentes hauteurs...), les chercheurs déterminent la conception optimale en combinant des critères de production et d'impact environnemental. Le



même type de calcul permet également de proposer une conception optimisée en lien avec de multiples usages compatibles avec la surface de sol occupée, par exemple à des fins agricoles. Enfin bien sûr, il faut aussi considérer le recyclage des panneaux afin de régénérer les matériaux qui les constituent. Une analyse du cycle de vie complet évalue le coût écologique des panneaux et du câblage associé, à intégrer dès la conception du système photovoltaïque. Compte tenu du nombre de paramètres et de critères à traiter, les chercheurs s'attachent à proposer une méthode de conception par optimisation qui sélectionne les solutions les plus durables parmi un très grand nombre de choix possibles. ●



## contributeurs

Catherine Azzaro-Pantel

Laboratoire de Génie Chimique

Unité mixte de recherche 5303

INPT/CNRS/Université Toulouse III

Stéphan Astier

Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie

Unité mixte de recherche 5213

Université Toulouse III/CNRS/INPT

## LEXIQUE

### WATT CRÊTE (Wc)

Le Watt crête est une unité de mesure de la puissance « crête » d'un panneau photovoltaïque qui représente la puissance délivrée par le panneau au point de puissance maximum dans des conditions standard (ensoleillement de 1 kW/m<sup>2</sup> de spectre AM1.5 à 25 °C).  
1 GWc = 1 Milliard Wc.



### Panneaux photovoltaïques générateurs d'électricité

La production d'électricité d'origine photovoltaïque, en forte croissance, a été décuplée en cinq ans.

©CNRS Photothèque/Fresillon Cyril

# LE PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE : concilier la pluridisciplinarité pour accélérer l'innovation

## contributeurs

**Kathleen Moineau-Chane Ching**  
Laboratoire de Chimie de Coordination  
Unité propre de recherche 8241 CNRS

**Isabelle Séguy, Eléna Bedel-Pereira**  
Laboratoire d'Analyses et d'Architecture des Systèmes, unité propre de recherche 8001 CNRS

**Christina Villeneuve**  
Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie  
Unité mixte de recherche 5213  
Université Toulouse III/CNRS/INPT

**Fabienne Alary**  
Laboratoire de Chimie et Physique Quantiques  
Unité mixte de recherche 5626  
CNRS/Université Toulouse III

L'un des défis technologiques de notre siècle est de produire de l'électricité avec la lumière du soleil et ce, à partir de cellules souples de petite taille (1 à 20 cm<sup>2</sup>) s'intégrant dans notre quotidien.



← **Molécules actives**  
Les molécules actives peuvent être isolées sous forme de cristaux (*ci-contre*) ou d'huile (*à gauche*).

**L**es panneaux solaires, ces grandes plaques bleutées apposées sur nos toits, transforment l'énergie solaire en électricité. Leur couleur est due au matériau actif qui les compose : le silicium. Mais dès 1986 l'intérêt de certaines molécules

organiques pour la fabrication de panneaux solaires a été démontré. Elles peuvent être déposées sur des supports souples en très fines couches (100 nanomètres), comme de l'encre sur du papier, avec en vue des applications nomades, telles que des chargeurs solaires pliables et transportables.

Les cellules photovoltaïques organiques sont élaborées à partir de polymères ou de peti-

tes molécules qui sont capables de transporter les électrons sous l'action de l'énergie solaire. Elles associent deux matériaux (l'un qui donne des électrons, l'autre qui les attire) disposés de façon à faciliter le passage du courant, c'est pourquoi l'architecture de ces cellules est cruciale.

## EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

Des techniques empruntées aux nanotechnologies permettent de déterminer la structure intime des matériaux ainsi que leurs propriétés électriques à cette échelle. Nos travaux concernent la synthèse de nouvelles molécules et la modélisation théorique, qui rendent possible la caractérisation structurale et électronique des matériaux, et s'éten-

dent jusqu'à la mise au point d'un prototype de cellule performante. Depuis une vingtaine d'années, les chimistes ont proposé un nombre incroyable de composés organiques ayant en commun des propriétés de semi-conducteurs\*. De nombreux verrous, notamment sur le choix et l'optimisation des matériaux ou sur l'architecture des composants ont ainsi été levés. ●

## LEXIQUE

### SEMI-CONDUCTEUR ORGANIQUE

Matériau composé essentiellement de carbone et d'hydrogène qui peut présenter une conductivité intermédiaire à celle d'isolants et de métaux.

# LE BÂTIMENT INTELLIGENT ADREAM

## pour la gestion et l'optimisation de l'énergie



**contributeur**

**Bruno Estibals**  
Laboratoire d'Analyses  
et d'Architecture des Systèmes  
Unité propre de recherche 8001 CNRS



Un bâtiment à énergie positive de 1 700 m<sup>2</sup> dédié à l'intelligence ambiante et aux systèmes cyberphysiques, c'est-à-dire capable de lier le monde virtuel informatique au monde réel des objets physiques tel est l'enjeu du projet Adream dont le bâtiment emblématique a été inauguré par le LAAS en 2012. Ce bâtiment expérimental combine plusieurs sources d'énergie pour un total de 100 kWc : photovoltaïque (720 m<sup>2</sup> de panneaux dont une façade bi-verre/tri-verre remarquable), géothermie peu profonde associée à une pompe à chaleur, et géothermie de surface via un puits canadien. Le comportement global du réseau d'énergie pourra ainsi être évalué puis validé à l'échelle d'une infrastructure réelle. La gestion raisonnée des transferts d'énergie, avec renvoi éventuel sur le réseau électrique des surplus non consommés, permettra d'expérimenter la notion de *Smart grid*,

terme qui désigne un réseau de distribution d'énergie incluant non seulement le transport mais aussi des capacités de télécommunication et de mesures via des capteurs ainsi que des capacités de gestion avancée. Avec une plateforme photovoltaïque unique en son genre à leur disposition, les chercheurs planchent sur la gestion et l'optimisation de l'énergie pour concevoir des réseaux de nouvelle génération, réactifs et adaptatifs, aux performances validées et sûres de fonctionnement. Pour obtenir un *smart grid*, ils vont élaborer des modèles intégrant les sources d'énergie et les besoins des différents utilisateurs, en l'occurrence les habitants du bâtiment. Des approches de gestion et d'optimisation de l'ensemble du système, intégrant les comportements possibles de toutes les entités de production et de consommation

L'enjeu du projet Adream est d'imaginer un bâtiment à énergie positive capable de lier le monde virtuel informatique au monde réel des objets physiques.

### Bâtiment à énergie positive

Volet énergie du projet Adream.  
© JB Meybeck  
pour le Laas-CNRS



du réseau électrique, y compris du point de vue sociologique, seront proposées par un déploiement massif de réseaux de capteurs intelligents et autonomes en énergie. La question énergétique est en effet cruciale à l'échelle mondiale. En France, l'une des actions les plus visibles des producteurs d'énergie, EDF en tête, qui déploient des infrastructures de compteurs électriques intelligents dont seront équipés tous les foyers de consommateurs en 2015. ●



# LA BIOMASSE

## DÉSHYDRATATION DE LA BIOMASSE HUMIDE utilisée à des fins énergétiques

**Pour convertir la biomasse en énergie il faut réduire la quantité d'eau qu'elle contient. De nouveaux procédés de déshydratation sont développés.**



Une partie de la biomasse utilisée pour la production est constituée d'herbacées ou de graminées. D'autres sources de carbone renouvelable, telles que les boues résiduaires urbaines et les déchets des industries agroalimentaires,

peuvent également être utilisées pour la production d'énergie afin de limiter la surexploitation des ressources. Pour convertir directement la biomasse en énergie par voie thermochimique, il est impératif de réduire la quantité d'eau qu'elle contient. En effet si la biomasse reste humide, une partie de l'énergie utilisée pour sa transformation va servir à chauffer et à vaporiser l'eau. Les herbacées, les déchets et les boues résiduaires contiennent entre 70 et 85 % d'eau. Avant d'utiliser cette biomasse, il faut réduire cette teneur en eau jusqu'à environ 15 % pour les boues et 30 % pour les herbacées. Les procédés de séchage conventionnels ont un ratio de consommation énergétique\* compris entre 1.25 et 2.5, alors qu'un ratio de 0.7 est optimal. De nouveaux procédés

de déshydratation mécanique et thermique à haute efficacité énergétique et à faible impact environnemental doivent être développés. Les chercheurs étudient en particulier l'opération de pressage de la biomasse herbacée pour obtenir un tourteau fibreux, qui est transformé en combustible solide après séchage.

### ASTUCIEUSE FUMÉE

Une réduction de 43 % de la consommation énergétique nécessaire à cette opération est obtenue lorsque le pressage s'accompagne du transfert d'eau hors des cellules végétales par voie thermique et de 55 % lorsque l'énergie des buées et fumées sortant du sécheur est récupérée. Astucieusement, les fumées de combustion, introduites à 450°C dans le four rotatif, apportent l'énergie nécessaire au séchage, se refroidissent et se chargent en humidité lors de leur passage dans le four. À la sortie, un refroidissement des fumées jusqu'à une température inférieure à la température de rosée permet de récupérer de la chaleur à basse température, utilisée pour chauffer le procédé de pressage. ●



### contributeur

Patricia Arlabosse  
Centre de recherche d'Albi en génie  
des procédés des solides divisés,  
de l'énergie et de l'environnement  
Unité mixte de recherche 5302 EMAC/CNRS

### La mauve de Virginie

Une herbacée utilisée pour produire de l'énergie.

© S. M. Dutnau

### LEXIQUE

### RATIO DE CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

C'est le facteur multiplicatif entre l'énergie consommée consacrée à un usage (chauffage, transport, ...) et l'énergie primaire produite à partir d'une ressource (charbon, pétrole, déchets, solaire...)

Énergie primaire = ratio de consommation énergétique x énergie consommée.

# TORRÉFACTION DE LA BIOMASSE POUR L'ÉNERGIE



## contributeurs

Sylvain Salvador, Baptiste Colin  
Centre de recherche d'Albi en génie  
des procédés des solides divisés,  
de l'énergie et de l'environnement  
Unité mixte de recherche 5302 EMAC/CNRS  
Jean-Michel Commandré  
CIRAD Montpellier



Chacun connaît la torréfaction du café, qui permet de révéler ses arômes. Le principe est un chauffage à basse température, généralement entre 200 et 300°C, en l'absence d'oxygène. Cette technique, appliquée à la biomasse, présente un avantage considérable : la biomasse torréfiée est plus facilement broyable que la biomasse brute. Actuellement, les biomasses lignocellulosiques constituent l'une des principales sources d'énergie renouvelable. Cependant, que ce soit en combustion pour la production de chaleur ou d'électricité, ou pour la production des carburants de demain, de nombreux procédés ne peuvent être alimentés que par des particules très fines. Or, il s'avère qu'un tel broyage demande une énergie colossale, énergie que la torréfaction permet de réduire. L'explication tient aux différents composants de la biomasse : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Les hémicelluloses étant dégradées par la chaleur, la liaison entre les

fibres de cellulose n'est plus assurée, ce qui fragilise la structure et rend le matériau friable. L'énergie nécessaire pour le broyage est ainsi réduite d'un facteur allant de 5 à 10. En outre, la cellulose et la lignine étant peu dégradées, la densité énergétique de la biomasse est conservée. Des unités de production ont déjà vu le jour, mais de nombreuses recherches sont encore menées sur cette thématique pour optimiser la torréfaction afin d'obtenir un produit homogène et répondant aux besoins industriels. Ces recherches mettent en œuvre des réacteurs de laboratoire, permettant d'étudier différents degrés de torréfaction en fonction de la température et du temps d'exposition. Des procédés comme le four tournant font aussi l'objet de recherches. Des essais mécaniques sont ensuite réalisés sur les biomasses torréfiées pour déterminer l'énergie nécessaire à leur broyage. Enfin, des tests complémentaires peuvent être effectués pour mettre en conformité la biomasse torréfiée avec d'autres applications, comme la production de granulés. ●

**Le principe de la torréfaction est un chauffage à basse température en l'absence d'oxygène. Cette technique appliquée à la biomasse permet de la rendre plus facilement broyable que la biomasse brute.**



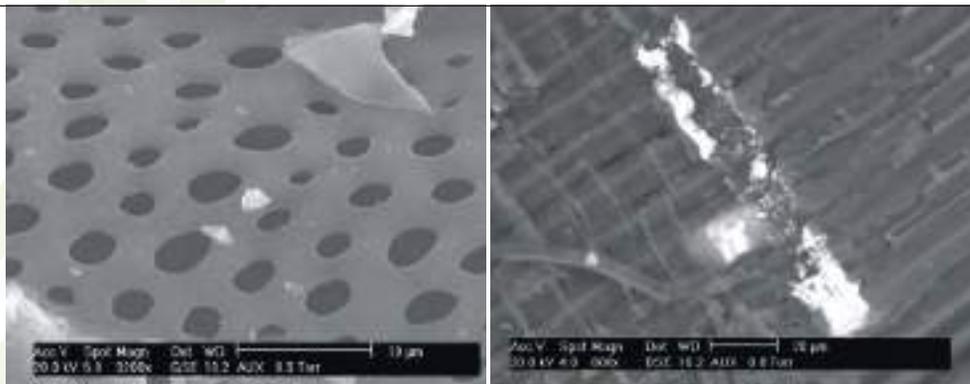
## Torréfaction

Intérieur d'un four tournant opérant la torréfaction de plaquettes de bois.



# VALORISATION DE RÉSIDUS DE BIOMASSE

La gazéification de la biomasse génère des résidus solides poreux qui sont valorisables.



↑ **Deux propriétés** permettent de valoriser les biochars : leur très grande porosité (à gauche) et la présence de résidus métalliques (contraste blanc, à droite).

L'utilisation de ressources renouvelables pour la production d'énergie constitue une voie alternative aux énergies d'origine fossile. Un procédé tel que la gazéification\* permet de convertir le carbone, l'oxygène et l'hydrogène présents dans la biomasse en hydrogène et en hydrocarbures à fort pouvoir énergétique. Cependant, tous les atomes de carbone ne sont pas convertis et ce procédé donne lieu à la formation de molécules liquides lourdes (tar, goudrons) et à des résidus solides comme les charbons ou

les cendres qui peuvent être valorisés. Les cendres, formées lorsque la combustion est complète, contiennent des minéraux qui constituent des apports nutritifs intéressants pour la culture des plantes. Les résidus solides issus d'une combustion incomplète (biochars) contiennent encore beaucoup de matière organique, ce sont par exemple les charbons utilisés pour les barbecues ou, industriellement, dans des chaudières. Plusieurs voies de valorisation de ces biochars sont envisagées. Elles se basent sur deux propriétés de ces matériaux : (1) leur capacité à catalyser des réactions chimiques, grâce à la présence de résidus organiques et métal-



## contributeurs

Elsa Weiss-Hortala, Doan Pham Minh, Ange Nzihou  
Centre de recherche d'Albi en génie des procédés des solides divisés, de l'énergie et de l'environnement  
unité mixte de recherche 5302  
CNRS/École des Mines d'Albi

liques, et (2) leur très grande porosité, similaire à celle des charbons actifs. Ainsi, il a été montré que le tar et les hydrocarbures produits au cours de la gazéification (méthane, propane) sont plus réactifs en présence de biochars. Ceux-ci peuvent également être utilisés comme catalyseurs pour accélérer et faciliter des réactions chimiques.

## A MOINDRE COÛT

Ceci est intéressant, à la fois dans le gazéifieur, mais aussi pour ouvrir la possibilité de produire des catalyseurs à moindre coût. Reste cependant pour le développement de ces matériaux, la nécessité de déterminer l'interaction entre leurs différents constituants (fonctions organiques, métaux et minéraux) ainsi que leur influence sur les propriétés catalytiques du solide résultant. ●

## LEXIQUE

### GAZÉIFICATION

Opération thermochimique permettant de transformer la biomasse en gaz énergétique (hydrogène, syngas, méthane...). Il résulte de cette transformation trois résidus : solide (char/cendre), liquide (tar) et gazeux (gaz énergétique).

# LE COMPOSTAGE et les milieux poreux réactifs biologiques



**contributeur**

Gérald Debenest

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

Unité mixte de recherche 5502

INPT/CNRS/Université Toulouse III

## E

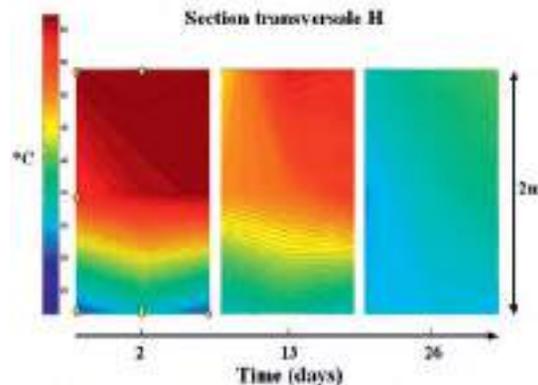
n France, nous produisons annuellement 340 millions de tonnes de déchets. Environ 30 millions de tonnes sont produites par les ménages, soit 472 kg/an/habitant. Ce chiffre tend à se stabiliser après des années

d'augmentation. Il est possible de traiter ces déchets par incinération (valorisation énergétique), par enfouissement (production de biogaz) ou par compostage. 518 installations de compostage étaient en fonctionnement en France au début de l'année 2009, avec une capacité de traitement comprise entre 1000 et 100 000 tonnes/an. Le compostage consiste à utiliser l'activité naturelle des bactéries présentes dans les déchets, pour les stabiliser en augmentant la concentration en minéraux (azote, phosphore, potassium) et les utiliser comme amendement pour les sols. Phénoménologiquement, les bactéries utilisent l'oxygène de l'air pour consommer

le carbone dissous dans des conditions favorables d'humidité et de température. Si jamais l'environnement est trop sec, les températures trop basses ou trop hautes, l'activité biologique s'arrête. Nos recherches ont permis de consolider les modèles numériques existants qui décrivaient bien la partie biochimique (comportement des bactéries sur la matière organique) mais assez mal le transport des molécules nécessaires au développement des bactéries (oxygène et eau).

### OPTIMISER LE PROCESS

En prenant en compte le transport de ces molécules, nous avons proposé de nouvelles pistes pour apporter l'oxygène au sein du compost. Ceci se traduit par une réduction de l'apport énergétique nécessaire au compostage et mais aussi du taux de matières pathogènes. Ces avancées permettent d'optimiser le fonctionnement des unités en regard de critères tels que le coût de traitement, la durée de traitement (aujourd'hui un déchet passe environ un mois dans une unité de traitement puis il est mis en tas pour finir sa dégradation) et la réduction des éléments pathogènes produits par la biomasse. ●



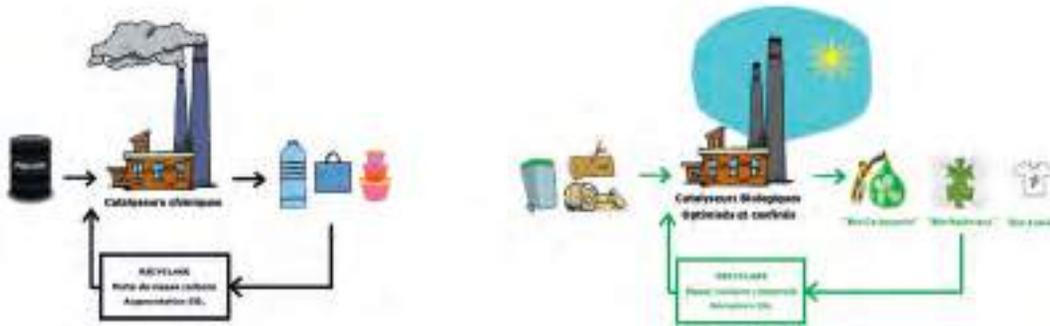
↑ **Température** Représentation d'un champ de température obtenu par expérimentation au sein du massif en cours de compostage. L'échelle de température va de 10°C (bleu foncé) à 70°C (rouge foncé). L'échelle de temps va, elle, de 2 à 26 jours.

“ En France, nous produisons annuellement 472 kg de déchets par habitant



# LA BIOLOGIE DE SYNTHÈSE : une alternative à la pétrochimie

La raréfaction du pétrole et les règles environnementales incitent chercheurs et industriels à (ré)explorer les richesses de la nature.



↑ **Biologie de synthèse versus pétrochimie :**  
vers une éco-biochimie.

**P**endant des millénaires, l'homme a tiré parti de la nature pour se procurer tout ce qui était nécessaire à son bien-être. Au début du siècle dernier les avancées en chimie organique avec l'utilisation des dérivés du pétrole ont permis à l'homme de créer de nouveaux produits synthétiques tels que les plastiques. La raréfaction du pétrole et les règles environnementales de plus en plus strictes incitent depuis quelques années chercheurs et industriels à (ré)explorer la richesse de la nature à la recherche de pro-

duits nouveaux pouvant contourner ceux de la filière pétrochimique.

## INGÉNIERIE DU VIVANT

Parce que les organismes vivants sont dotés de fonctions catalytiques aux potentialités remarquables, il est parfaitement envisageable avec nos connaissances actuelles d'introduire par des méthodes de génétique et de biologie moléculaire de nouvelles fonctions au sein d'un système biologique existant. Cette ingénierie du vivant porte le titre de biologie de synthèse. Par cette approche, il est envisagé de produire à partir d'agro ressources (déchets



### contributeur

Jean-Marie François  
Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes  
Biologiques et des Procédés  
Unité mixte de recherche 5504  
INSA / CNRS / INRA

verts, de bois, de papier, de paille...) des molécules appelées synthons qui seront utilisées pour la confection de nouveaux matériaux biodégradables ayant des propriétés identiques à ceux issus de l'industrie pétrochimique. L'exemple actuellement en développement est le Sorona®, un textile biologique produit par la société américaine *DuPont*. Notre laboratoire vient d'innover dans ce domaine en réalisant une prouesse technologique en introduisant au sein d'une bactérie une voie métabolique artificielle produisant un synthon utile pour la nutrition animale et la chimie de synthèse.

Ainsi, la biologie de synthèse apparaît comme une alternative à la pétrochimie. En contrôlant son utilisation dans un cadre réglementaire respectant éthique et morale, elle pourra apporter une solution respectueuse de l'environnement, ainsi qu'un bénéfice socio-économique au travers du développement d'une nouvelle filière industrielle. ●

# TOULOUSE WHITE BIOTECHNOLOGY (TWB)



**contributeur**

Pierre Monsan

Toulouse White Biotechnology

Unité mixte de services 1337

INRA/INSA/CNRS

**TWB est un centre de recherche d'excellence dans le domaine des biotechnologies industrielles.**



## **Biocatalyseurs**

Criblage automatisé d'une banque de microorganismes à la recherche d'un clone d'intérêt.



Le centre de recherche a une mission de démonstrateur préindustriel en biotechnologies industrielles, c'est-à-dire qu'il vise à développer des produits ou des procédés dont la preuve de concept scientifique a déjà été établie. Il doit permettre d'apporter plus rapidement la confirmation de faisabilité industrielle, étape indispensable entre la recherche fondamentale ou appliquée et la production de masse. Ce centre a comme objectif de développer les catalyseurs biologiques du futur (enzymes, microorganismes, consortia microbiens). Ces biocatalyseurs permettent de transformer des matières premières renouvelables, d'origine végétale (biomasse lignocellulosique), en composés d'intérêt pour l'industrie : intermédiaires pour la chimie, produits énergétiques, biomatériaux, biopolymères. Chaque projet s'accompagne d'une réflexion éthique et d'une réflexion de développement dura-

ble (analyse de cycle de vie, éco-compatibilité). L'un des axes de recherche a pour objectif de développer du biokérosène pour l'industrie aéronautique à partir des lipides accumulés par des levures nourries de sucres (huiles microbiennes). Le but est de permettre à l'industrie aéronautique d'envisager des sources de carburants complémentaires des sources actuelles, qui sont uniquement d'origine pétrolière, en prévision de la diminution de disponibilité des ressources fossiles. ●

**TWB** s'appuie sur le Laboratoire d'ingénierie des systèmes biologiques et des procédés et sur un consortium regroupant 38 partenaires publics (organismes de recherche, collectivités territoriales, pôles de compétitivité) et privés (grands groupes, PME, start-up, investisseurs financiers), en collaboration avec l'École supérieure d'éthique des sciences de l'Institut catholique de Toulouse.



**Direction générale :** José Biosca

**Coordination :** Pascal Lemoine et Isabelle Dixon (CNRS)

**Secrétariat de rédaction :** Jean-Paul Bobin

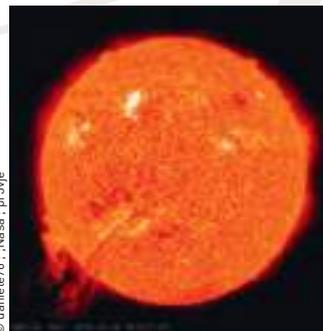
**Création graphique :** Sandrine Lucas

**Comité de Rédaction CNRS :** Patrick Mounaud, Carine Desaulty, Isabelle Dixon et Martine Meireles, avec Marie Aizpuru, Nathalie Boudet, Cendrine Fouquereau, Yves Goddérés, Valeria Medina-Ambiado, Marie-Laure Pierucci.

**Diffusion :** La Dépêche du Midi

**Impression :** Ccmprint Toulouse

Bien que la société Le Cèdre ait fait tout son possible pour citer correctement et contacter la source et/ou le(s) détenteur(s) du copyright de chaque image, nous nous excusons par avance de toute erreur ou omission involontaire, qui serait immédiatement corrigée dans les prochaines éditions.



© danieler76 : Nasa ; Pro3yJe



Journal de la Démocratie

Groupe La Dépêche du Midi

Société Anonyme au capital de 3.577.010 euros

Siège : Avenue Jean Baylet, 31095 Toulouse CEDEX

Tél : 05 62 11 33 00 - Fax 05 61 44 74 74

e-mail : contact@ladepeche.com

Président d'Honneur, directeur de la Publication :

**Evelyne-Jean BAYLET**

Président Directeur Général et responsable de la Rédaction :

**Jean-Michel BAYLET**

Directeur de la Publication :

**Jean-Nicolas BAYLET**

Commission paritaire n : 0310 C 87785 – ISSN 0181-7981

## REMERCIEMENTS

Le Cèdre/Groupe La Dépêche tient à remercier les laboratoires de Midi-Pyrénées, le service communication de la Délégation Midi-Pyrénées du CNRS, Science Animation, l'Europe, Toulouse Métropole (en particulier Claire-Marie Genestar, Clément Cohen et Antoine Maurice), la CASDEN et la MGEN.

