

Les énergies du futur

8^e colloque pluridisciplinaire d'Orsay

On admet de plus en plus que le réchauffement climatique actuel est lié à l'augmentation inconsidérée des consommations énergétiques des sociétés de type « occidental » et qu'il est urgent de passer à un mode de production et de consommation énergétiques qui prenne en compte le facteur environnemental. « Les énergies du futur » ont donc été choisies comme thème pour le 8^e colloque pluridisciplinaire d'Orsay, qui s'est tenu le 22 mars. Ce colloque a été organisé par la faculté des sciences d'Orsay en partenariat avec le CNRS, sous la responsabilité scientifique de Jean-Jacques Girerd (ICMMO). Cet article, rédigé par le Centre de Vulgarisation de la Connaissance (Université Paris-Sud, CNRS), présente un petit aperçu des grands thèmes abordés lors de cette journée.

Énergie de fission

Si le nucléaire doit pallier la disparition des énergies fossiles et prendre en charge les demandes croissantes des pays émergents, un scénario, même modéré, prévoit la multiplication par 8 de la production électrique (conférence 1). A ce rythme, les centrales « classiques » auront vite épuisé les réserves d'uranium facilement exploitables. Une autre technologie, celle des surgénérateurs, pourra devenir économiquement viable au milieu du XXI^e siècle. Dans une centrale nucléaire classique l'uranium 235 est utilisé comme combustible fissile. Mais cet isotope de l'uranium ne représente que 0,7 % du minerai d'uranium. Deux autres noyaux, dits fertiles, pourraient être utilisés pour la fission : l'uranium 238 (99,3% du minerai) et le thorium 232, également très abondant sur Terre. A partir de ces noyaux fertiles, des noyaux fissiles peuvent être obtenus (plutonium 239 et uranium 233). Dans les surgénérateurs, les neutrons générés par la fission servent à la fois à entretenir la réaction et à régénérer les noyaux fissiles à partir du combustible fertile. Deux avantages : utiliser au mieux les réserves d'uranium (ou de thorium) et produire moins de déchets radioactifs. Inconvénients : des technologies lourdes et coûteuses (refroidissement par sodium ou plomb liquide pour la filière uranium, utilisation de combustible liquide sous forme de sels fondus pour le thorium). Elles ne pourront

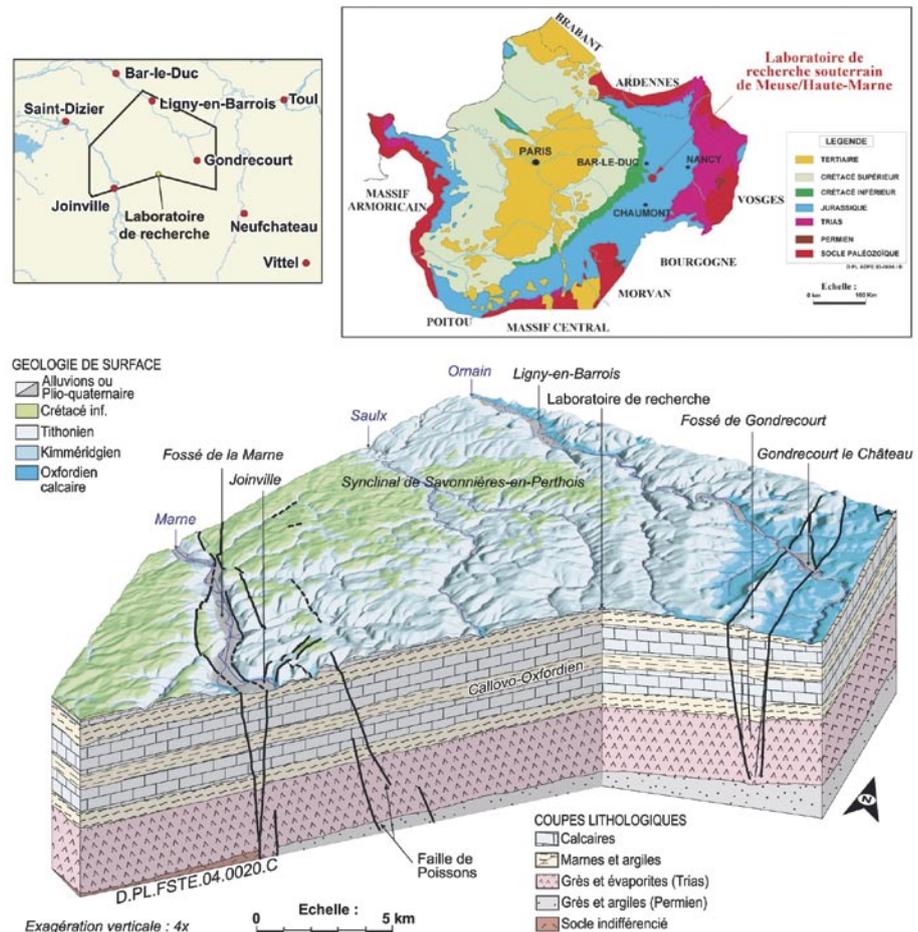


Figure 1 : Bloc diagramme géologique 3D du secteur de Meuse/haute-Marne (Andra, Evaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Dossier 2005 Argile)

émerger que si l'uranium devient très cher. Pour démarrer un parc de surgénérateurs, il faut un stock de plutonium suffisant (qui sera ensuite régénéré). Conserver ce plutonium, actuel déchet de nos centrales, plutôt que de le vitrifier, est un choix à faire dès maintenant : en effet, les temps caractéristiques dans le nucléaire - durée de vie des centrales, accumulation de combustibles - sont de quelques dizaines d'années. Parallèlement à la réflexion sur les réacteurs nucléaires du futur, un autre débat s'engage autour du stockage des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue (conférence 2). D'après la loi du 28 juin 2006, ce stockage devra être réversible pendant au moins 100 ans (pour permettre leur destruction si une nouvelle technologie apparaît) et faire l'objet d'un débat public. Plusieurs laboratoires en Europe réalisent des

études dans des formations argileuses pour étudier les meilleures conditions de stockage. L'argile est très peu perméable, très peu poreuse, pauvre en eau et possède des capacités importantes de rétention d'éléments variés, y compris les éléments radioactifs. Elle a une bonne résistance mécanique et sa fracturation est très limitée. En France, c'est le site de Meuse-Haute Marne qui est actuellement à l'étude, loin de toute zone sismique. Un laboratoire est actuellement construit dans une couche profonde, le callovo-oxfordien de 130 mètres d'épaisseur (figure 1), jusqu'à 490 mètres de profondeur. Une attention toute particulière est accordée aux roches argileuses fragilisées par l'excavation qui est nécessaire pour la construction du futur site de stockage. De nombreuses recherches, notamment sur les matériaux qui assurent le stockage,

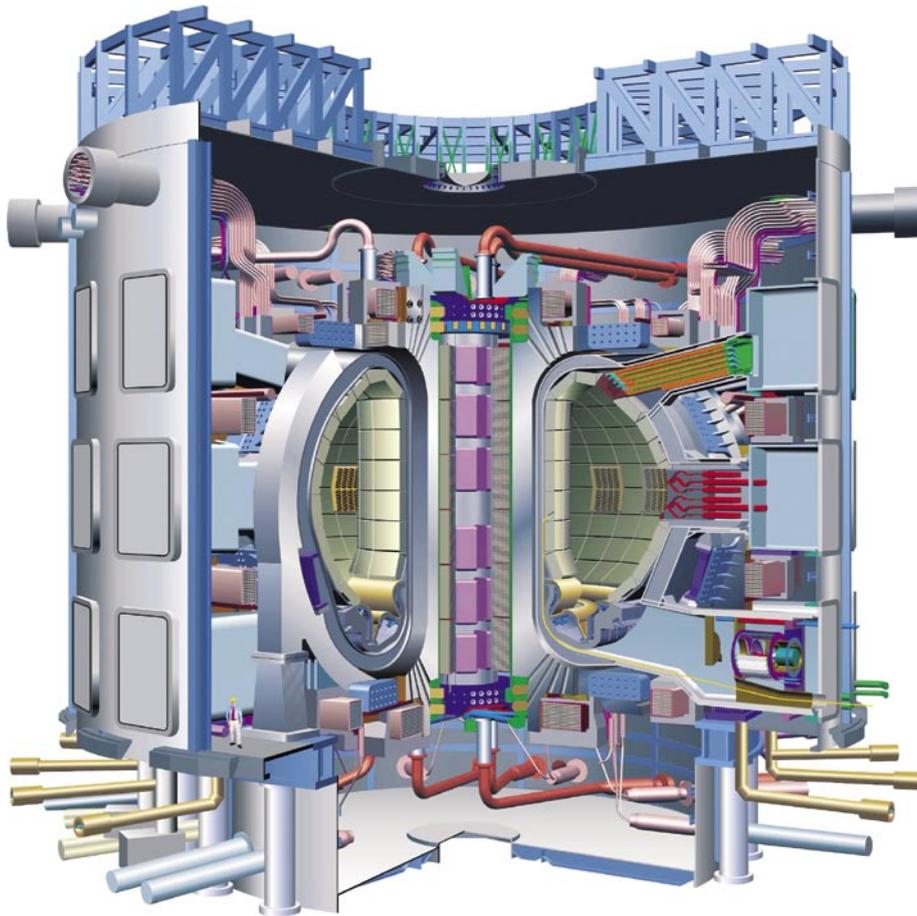


Figure 2 : Schéma du futur réacteur pour la fusion nucléaire ITER en construction sur le site de Cadarache.

s'articulent autour de ce projet. Une zone de l'ordre de 200 km², exempte de failles majeures, sera étudiée par les géologues pendant les prochaines années pour le projet d'implantation de ce site de stockage.

Énergie de fusion

Casser un « gros » noyau atomique fournit de l'énergie : c'est la fission ; assembler deux petits noyaux fournit aussi de l'énergie : c'est la fusion. La première est mise en œuvre dans les centrales nucléaires actuelles, la seconde pas encore ! Maîtriser la fusion thermonucléaire, c'est le but du projet ITER (conférence 3). Il s'agit de faire fusionner du deutérium et du tritium (réaction plus « facile » à amorcer que la fusion de deux noyaux d'hélium). Le deutérium est présent en abondance dans l'eau de mer, le tritium peut être obtenu à partir du lithium. Si un tel projet fonctionne, c'est de l'énergie assurée pour des milliers d'années, presque sans déchets radioactifs et avec moins de risques de prolifération d'armes que le nucléaire de fission. Oui mais... ce n'est pas simple ! Deux difficultés majeures :

porter la matière à des dizaines de millions de degrés pour initier la réaction et « confiner » ce plasma à des températures qu'aucun matériau ne supporterait. La machine capable de faire cela s'appelle un tokamak : à l'aide de champs magnétiques puissants et de géométrie complexe, le plasma est confiné dans une prison immatérielle torique. Pour le chauffer à des températures dix fois plus élevées que celle du cœur du Soleil, de puissants courants électriques, des particules neutres, des micro-ondes y sont injectés. Avant d'arriver à contrôler la fusion sur Terre, il faudra encore une vingtaine d'années, nécessaires à la construction d'un tel réacteur (figure 2), et à la maîtrise de nombreuses difficultés technologiques inédites.

Mais la fusion existe déjà dans la nature : c'est l'énergie du Soleil (conférence 4). Au cœur de notre étoile, à chaque seconde, 4,25 millions de tonnes d'hydrogène disparaissent pour donner de l'hélium. Cette énergie libérée s'oppose à la gravitation qui tendrait à faire s'effondrer l'étoile sur elle-même. Quand l'hydrogène sera épuisé, le Soleil se contractera, se réchauffera encore plus permettant la nucléosynthèse du carbone, de l'azote

et l'oxygène... de tous les éléments de l'univers. Selon la formule consacrée, nous sommes tous poussières d'étoiles...

Énergie géothermique

C'est bien sûr le Soleil qui nous fournit la plus grande quantité d'énergie (150 W/m² au sol en France en moyenne). Cependant, l'énergie d'origine géothermique, bien que 100 000 fois inférieure, est considérable (conférence 9). Elle résulte de l'énergie emmagasinée lors de la formation de la Terre (dont le noyau de fer liquide est à la température de 6 600°C) mais provient surtout de la désintégration radioactive d'éléments constituant les roches. La chaleur correspondante se propage vers la surface et crée un gradient de température : elle augmente en moyenne d'une trentaine de degrés par kilomètres de profondeur. Comment exploiter cette chaleur ? Essentiellement en récupérant celle contenue dans les roches à l'aide d'un fluide caloporteur. Les procédés dépendent de la température de celles-ci et de leur capacité de transmission de la chaleur. La connaissance des propriétés des eaux souterraines et notamment de leur circulation au sein des roches est indispensable pour optimiser l'utilisation de l'énergie géothermique. Des études sur la circulation des eaux thermales y contribuent. En Grèce, par exemple, on a pu comprendre l'acidité et la salinité de sources thermales qui mélangent l'eau douce et l'eau salée de la mer Egée, toute proche. Les modèles ont permis également de dater ces eaux thermales, vieilles de 7 000 ans, ce qui traduit la lenteur de leur circulation au sein des roches.

Énergie de la photosynthèse

La photosynthèse est à l'origine des principales sources d'énergie actuelles (conférence 5) : énergies fossiles (pétrole, charbon...), biomasse (bois, biocarburant...). Apparue sur Terre il y a plus de 2,5 milliards d'années, elle permet la transformation du carbone minéral (le plus souvent sous forme de CO₂) en carbone organique, étant ainsi le point de départ des chaînes alimentaires. Elle se produit dans les chloroplastes des plantes et algues, ainsi que chez certaines bactéries (comme les cyanobactéries, dont certaines sont les ancêtres des chloroplastes, le schéma de la photosynthèse ayant été conservé au cours de l'évolution). La conversion de

l'énergie lumineuse en énergie chimique a lieu au niveau des centres réactionnels photosynthétiques, larges assemblages de protéines membranaires (**figure 3**) ; elle fait intervenir des pigments photosensibles (les plus connus sont les chlorophylles) et des chaînes de transport d'électrons (comprenant des quinones, des protéines fer-soufre...). Le donneur d'électrons le plus fréquent est l'eau, et son oxydation conduit à la production d'oxygène sur Terre ; chez les bactéries pourpres, qui sont anoxygéniques, c'est le sulfure d'hydrogène. Cette unicité de mécanisme s'accompagne par contre d'une grande diversité des récepteurs ou antennes (forme, longueur d'onde absorbée...) qui collectent le rayonnement solaire et de l'organisation des photosystèmes. Une question pour le futur : outre la production de biomasse, la photosynthèse pourrait-elle être exploitée dans la « filière hydrogène » ?

L'hydrogène comme vecteur énergétique

L'exploitation optimale des ressources énergétiques inclut aussi le stockage et le transport de l'énergie. L'hydrogène (dans ce cas : H_2) réagit avec l'oxygène (O_2) en libérant de l'énergie que l'on peut récupérer sous forme de chaleur ou d'électricité. H_2 n'existant pas dans la nature, on le produit par électrolyse ou photolyse de l'eau (ou encore par reformage des hydrocarbures), ce qui consomme de l'énergie. C'est donc un vecteur, il permet de stocker l'énergie pour l'utiliser plus tard selon un cycle « propre » qui ne consomme et ne produit que de l'eau (conférence 7). Une « économie de l'hydrogène » intégrant les étapes du cycle - production, stockage, distribution, utilisation - va se développer dans les décennies à venir pour les usages industriels, domestiques et les transports. La production, centralisée ou répartie dans de petites unités, est bien adaptée aux énergies renouvelables (**figure 4**). L'électrolyse de l'eau bénéficie de nouveaux catalyseurs pour réduire, voire supprimer, l'usage de métaux nobles (platine notamment). Le stockage d'hydrogène gazeux se fait à haute pression, ce qui pose des problèmes de sécurité ; les hydrures métalliques, composés solides instables qui libèrent l'hydrogène à la demande, offrent une alternative prometteuse. La distribution peut se faire en bouteilles mais aussi par un réseau de tuyaux comme il en existe dans le nord de la France. On peut même ajouter un peu

1. Concours de posters

Les organisateurs ont souhaité associer les étudiants de master et de doctorat à ce 8^e colloque multidisciplinaire, d'une part en leur offrant la possibilité d'assister aux conférences, ce qui leur a permis une prise de contact directe avec les chercheurs, d'autre part en réservant deux plages horaires dans la journée pour la présentation de posters. Cette présentation de posters s'est accompagnée de la remise de trois prix (500 euros chacun) correspondant à une subvention pour que les gagnants puissent participer à un congrès de leur choix. Les lauréats de cette année 2007 sont :

Céline Decaux-Moueza, doctorante au Laboratoire de Physico-chimie de l'Etat Solide (ICMMO), UPS-CNRS
Production d'hydrogène par vaporéformage du bioéthanol dans un réacteur catalytique à membrane.

Guillaume Espana, doctorant au Laboratoire de Mécanique et Energétique, école polytechnique de l'Université d'Orléans
Modélisation physique du sillage lointain des éoliennes à axe horizontal. Interactions d'éoliennes organisées en parc.

Arouna Darga et Moussa Soro, doctorants au Laboratoire de Génie Electrique de Paris (Supélec), UPS-CNRS
Cellules photovoltaïques en couches minces amorphes ou cristallines.

d'hydrogène au gaz naturel sans rien changer à nos appareils ! Enfin, les piles à combustible (production d'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène) sont très semblables aux électrolyseurs effectuant la réaction inverse, et bénéficient des mêmes progrès. Des appareils réversibles combinent les deux fonctions, par exemple pour stocker l'énergie le jour et la restituer la nuit. Lorsque la source d'énergie primaire que l'on souhaite utiliser pour produire l'hydrogène est la lumière solaire, il n'est pas nécessaire de passer par la conversion électrique et l'électrolyse de l'eau. Tous les organismes vivants photosynthétiques savent décomposer l'eau, sous l'action de la lumière, en oxygène O_2 et protons (c'est la photolyse). Certaines microalgues et les cyanobactéries sont de plus capables de réduire les protons en H_2 , achevant ainsi la décomposition. Les deux réactions sont catalysées par des métalloenzymes dépourvues de métaux nobles. Réaliser la photolyse de l'eau en s'inspirant des systèmes moléculaires naturels est un défi pour les chimistes inorganiciens (conférence 6). Ils synthétisent pour cela des complexes de métaux de transition biomimétiques, accomplissant chacun une fonction précise : convertir l'énergie lumineuse en énergie chimique, catalyser l'oxydation de l'eau, catalyser la réduction des protons en H_2 . A terme, ces recherches pourraient

déboucher sur un dispositif de photolyse de l'eau catalysée par des systèmes biomimétiques fixés sur des électrodes (**figure 5**).

Deux exemples de techniques innovantes pour l'utilisation de l'énergie

On peut transformer les sons en chaleur, et inversement. En d'autres termes, l'énergie acoustique et l'énergie

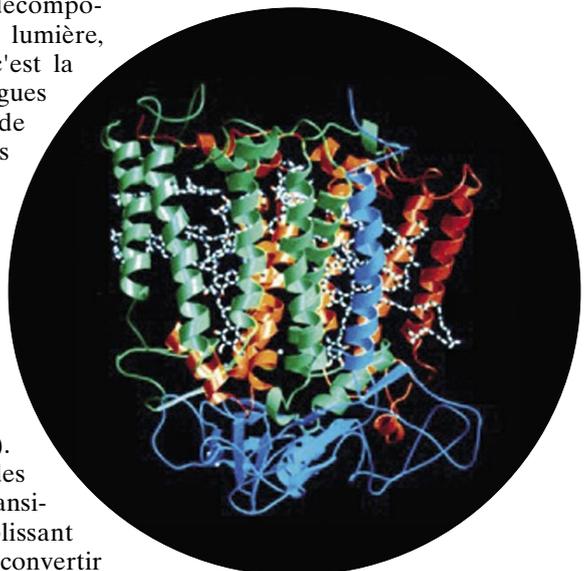


Figure 3 : Structure tri-dimensionnelle du centre photosynthétique de *Rhodobacter sphaeroides* (Arnoux et al., 1995, Arnoux and Reiss-Husson, 1996)

thermique peuvent être échangées, c'est le domaine étudié par la thermoacoustique (conférence 8). Pour comprendre ceci, il faut se souvenir que les sons correspondent à la propagation d'ondes de pression dans un gaz (par exemple l'air) et que, localement, le gaz est ainsi comprimé ou détendu. Or la compression d'un gaz l'échauffe (inversement, la détente le refroidit), d'où la possibilité d'échange entre sons et chaleur (ou froid). En réalité les applications actuellement développées concernent principalement la production de froid. La réfrigération thermo-

acoustique consiste à créer une onde sonore dans un long tube rempli d'un gaz tel que l'hélium et à récupérer le froid au niveau de fines plaques métalliques empilées, à l'aide d'un échangeur de chaleur. Son attrait vient de sa fiabilité et de l'absence de pièce mobile et de fluide réfrigérant. Elle permet d'atteindre de très basses températures (-150°C) mais ses performances en termes de puissance doivent encore progresser et la taille des tubes (plusieurs mètres) est un obstacle à l'utilisation domestique. Des prototypes de réfrigérateurs ou congélateurs thermoacoustiques sont développés pour les navettes spatiales par la NASA, pour la liquéfaction de gaz naturels et même pour conserver certaines glaces alimentaires! Plus généralement, la thermoacoustique pourrait permettre d'exploiter, au moins partiellement, les énormes rejets thermiques industriels.

Certains chercheurs s'intéressent à des sources d'énergie qui fournissent, non des méga ou gigawatts comme les centrales mais des milli ou microwatts (conférence 10). Il s'agit d'alimenter des dispositifs embarqués, comme les capteurs qui surveillent « de l'intérieur » la température des aliments, les déformations d'un ouvrage d'art ou la pression des pneus. Ces appareils ont besoin d'une faible puissance électrique pendant de très longues durées (parfois plusieurs dizaines d'années)

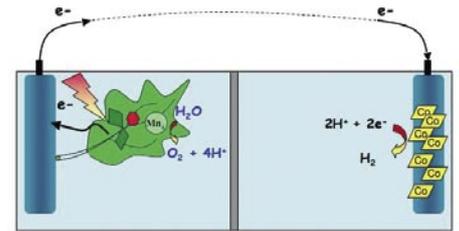


Figure 5 : schéma de principe d'une "feuille artificielle". La cellule de gauche comporte une photoanode qui catalyse l'oxydation de l'eau et la cellule de droite une électrode modifiée par un catalyseur à base de cobalt pour la réduction de protons en H₂.

© A. Aukauloo (ICMMO) /B. Rutherford (CEA)

pour lesquelles les piles sont inadaptées. Aussi l'on se tourne vers des énergies renouvelables et gratuites : après le solaire et les gradients thermiques, des prototypes exploitent aujourd'hui les vibrations engendrées par des machines, des véhicules ou notre propre corps. Ils devraient être prochainement intégrés à divers capteurs, voire à des vêtements « intelligents ». Deux voies sont développées : la conversion piézoélectrique, qui permet de produire quelques milliwatts, et la conversion électromagnétique, limitée à une fraction de milliwatt mais plus facile à intégrer dans les dispositifs existants. Tous ces générateurs sont complètement encapsulables, donc adaptés aux environnements clos (l'intérieur d'un pneu de voiture) et protégés de l'usure et de la poussière. Une alternative à long terme aux batteries, avec à la clé des économies et moins de métaux toxiques dans l'environnement !

Pour finir... en préparant l'avenir

Ce 8^e colloque multidisciplinaire, qui s'est achevé par une table ronde intitulée « Le réchauffement climatique, une incitation au développement d'énergies nouvelles » a accueilli un public très varié : étudiants participant à un concours de posters (encadré 1), habitants des communes voisines de l'Université, PME et sociétés de l'Essonne qui ont pu trouver des idées et des compétences, autorités politiques départementales et régionales. Souhaitons que des idées et collaborations nouvelles aient pu naître grâce à la diversité des participants qui ont eu l'occasion de partager leurs expériences au cours de cette journée. ■

CENTRE DE VULGARISATION DE LA CONNAISSANCE
(UPS/CNRS)



© CEITH, MARCOUSSIS

Figure 4 : L'hydrogène, vecteur d'énergie pour les applications de transport. Les capteurs photovoltaïques (gauche) produisent de l'électricité à partir du rayonnement solaire. Cette électricité sert à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau dans un électrolyseur (centre). Le véhicule (scooter, droite) fait le plein d'hydrogène. Il s'agit d'un véhicule électrique. La motricité est assurée par une pile à combustible et un moteur électrique.

2. Liste des conférences du colloque :

1. Quelles filières nucléaires pour le futur ?

Olivier Méplan, *Institut de physique nucléaire, UPS-CNRS*

2. Le stockage des déchets nucléaires en formation argileuse profonde

Maurice Pagel, *Interactions et dynamique des environnements de surface, UPS-CNRS*

3. Fusion magnétique et projet ITER

Jean-Marcel Rax, *Laboratoire de physique et technologies des plasmas, UPS-CNRS*

4. Le Soleil : une énorme machinerie énergétique

Frédéric Baudin, *Institut d'astrophysique spatiale, UPS-CNRS*

5. Bactéries, algues, plantes : Terre et Océan, le monde de la photosynthèse

Chantal Astier, *Centre de génétique moléculaire, CNRS*

6. Biomimétique moléculaire pour la photolyse de l'eau

Ally Aukauloo, *Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay, UPS-CNRS*

7. L'hydrogène comme vecteur énergétique

Pierre Millet, *Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay, UPS-CNRS* et Fabien Auprêtre, *Compagnie européenne des technologies de l'hydrogène*

8. Des rejets thermiques à valoriser : le froid thermoacoustique

Maurice-Xavier François, *Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur, UPS-CNRS-UPMC*

9. Ressources géothermiques : origine et circulation des eaux thermales naturelles

Christelle Marlin, *Interactions et dynamique des environnements de surface, UPS-CNRS*

10. Énergies pour les microsystèmes

Emile Martincic, *Institut d'électronique fondamentale, UPS-CNRS*