



**Ambassade de France à Washington
Mission pour la Science et la Technologie**

4101 Reservoir Road, NW, Washington DC 20007

Tél. : +1 202 944 6249

Fax : +1 202 944 6219

Mail : publications.mst@ambafrance-us.org

URL : <http://www.ambafrance-us.org>

Domaine	: Veille Scientifique et Technologique
Document	: Compte rendu de réunion scientifique
Titre	: Forum Energie et Nanotechnologie : stockage et distribution
Auteur(s)	: Roland Hérino, Attaché pour la Science et la Technologie : Rémi Delville, Volontaire International
Date	: 13 mars 2006
Contact MST	: Roland Hérino, attache.science@consulfrance-houston.org :
Numéro	: SMM06 032

Mots-clefs	: réseau électrique – distribution de l'électricité - stockage de l'énergie – énergies renouvelables – filière hydrogène – batteries – nanotechnologies – nanocomposites.
Résumé	: Ce rapport présente un compte rendu des deux journées de conférences organisées en novembre 2005 par le Baker Institute de Rice University, auquel s'était associé la Mission pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France, sur la thématique "Energie et Nanotechnologies" et focalisé sur le stockage et la distribution de l'énergie. L'objectif du forum était de faire le point sur l'état de l'art et sur les technologies émergentes dans le domaine, et d'étudier les perspectives offertes par les nanotechnologies pour contribuer au développement de nouvelles solutions techniques. Après une introduction du contexte du forum, ce rapport dresse dans une première partie le bilan des différents exposés présentés au cours de ces deux journées et y associe les commentaires des experts français qui y ont été invités. La deuxième partie donne le programme complet des conférences, ainsi qu'un bref résumé de chacune d'elles.

NB : Toutes nos publications sont disponibles auprès de l'Agence pour la Diffusion de l'Information Technologique (ADIT), 2, rue Brûlée, 67000 Strasbourg (<http://www.adit.fr>).

Forum Energie et Nanotechnologie :

Stockage et Distribution

15 et 16 novembre 2005

**Baker Institute
Rice University – Houston - Texas**

Compte Rendu

Rédigé par :

Roland Hérino, Attaché pour la Science et la Technologie,

Rémi Delville, Volontaire International

**Mission pour la Science et la Technologie,
Poste de Houston (TX)**

avec les rapports de mission de :

Gilles FLAMANT, Directeur de Recherches, Directeur du Laboratoire PROMES,
Jean-Marc LAYET, Professeur à l'Université de Marseille,
Olivier LOTTIN, Maître de Conférences, Laboratoire d'énergétique de Nancy,
Edward McRAE, Directeur de Recherche, Directeur Adjoint du Laboratoire
de Chimie du Solide Minéral de l'Université de Nancy.

Résumé :

Ce rapport présente un compte rendu des deux journées de conférences organisées en novembre 2005 par le Baker Institute de Rice University, auquel s'était associé la Mission pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France, sur la thématique "Energie et Nanotechnologies" et focalisé sur le stockage et la distribution de l'énergie. L'objectif du forum était de faire le point sur l'état de l'art et sur les technologies émergentes dans le domaine, et d'étudier les perspectives offertes par les nanotechnologies pour contribuer au développement de nouvelles solutions techniques. Après une introduction du contexte du forum, ce rapport dresse dans une première partie le bilan des différents exposés présentés au cours de ces deux journées et y associe les commentaires des experts français qui y ont été invités. La deuxième partie donne le programme complet des conférences, ainsi qu'un bref résumé de chacune d'elles.

Forum Energie et Nanotechnologie

15 et 16 novembre 2005

Baker Institute – Rice University

I Présentation générale

Dans le cadre de son Forum sur l'énergie, le Baker Institute de RICE UNIVERSITY organisait à Houston les 15 et 16 novembre le 3^{ème} et dernier séminaire d'une série intitulée "Energy and Nanotechnology" focalisé pour cette édition sur le réseau de distribution de l'électricité et le stockage de l'énergie. Cette manifestation à laquelle la Mission pour la Science et la Technologie (MST) de l'ambassade de France avait invité quatre experts français a permis de faire le point sur l'état de l'art et sur les technologies émergentes dans le domaine, et d'étudier les perspectives offertes par les nanotechnologies pour contribuer au développement de nouvelles solutions techniques.

I.1 Le contexte du Energy Forum

Le Baker Institute for Public Policy de l'Université de Rice développe depuis plusieurs années un programme focalisé sur l'énergie, appelé Energy Forum, dont l'objectif est de promouvoir un échange d'idées et une réflexion approfondie sur les problèmes énergétiques, en rassemblant les acteurs politiques, économiques et scientifiques, afin de contribuer à la mise en place d'une politique réaliste qui repose sur une analyse en profondeur de tous les aspects de la question. Dans ce cadre, il a mis en place en association avec le Center for Nanoscale Science and Technology et l'Environmental and Energy Systems Institute de Rice University une série de trois workshops intitulés "Energy and Nanotechnology" destinée à explorer les apports potentiels des nanosciences aux problèmes énergétiques. Le premier workshop qui s'est tenu en mai 2003 était intitulé "Strategy for the future", et a fait l'objet de la publication d'un rapport détaillé publié en mai 2005, le second, "Prospects for Solar Energy in the 21st century" s'est tenu à Houston les 16 et 17 octobre 2004, et le dernier workshop de la série qui a eu lieu les 15 et 16 novembre 2005 sur le Campus de Rice University était intitulé "Storage and the Grid" et était donc focalisé sur le stockage de l'énergie et le réseau de distribution de l'électricité.

La Mission pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France s'était associée à cette dernière manifestation en invitant 4 experts français, le Professeur Jean-Marc LAYET, de l'Université de Marseille, dont le laboratoire est l'un des acteurs du programme ITER, le Professeur Gilles FLAMANT, directeur du laboratoire PROMES spécialisé dans l'énergie solaire, le Dr Edward McRAE, directeur adjoint du laboratoire de Chimie du Solide Minéral de l'Université de Nancy, spécialiste des matériaux carbonés nanostructurés, et le Dr Olivier LOTTIN, du Laboratoire d'Energétique de Nancy et spécialiste des piles à combustible.

Ces deux journées ont rassemblé plus d'une centaine de participants et 26 conférenciers qui ont apporté différents points de vue, aussi bien sous l'angle politique, économique que scientifique ou technique. Elles ont été marquées par un hommage à la mémoire du Professeur Richard SMALLEY, Prix Nobel de Chimie 1995 pour sa découverte des Fullerènes, décédé le 28 octobre dernier, qui a fortement marqué le développement des nanosciences, en particulier à Rice University, et qui a été l'un des promoteurs et éminents acteurs de cette série de manifestations intitulées "Energy and Nanotechnology".

I.2 La distribution de l'électricité

Le réseau de distribution électrique aux Etats-Unis est ancien et a été conçu pour délivrer des puissances sans commune mesure avec les besoins actuels, et il doit être renouvelé même s'il arrive encore à répondre à la demande d'aujourd'hui. Cette perspective fait l'objet de nombreuses analyses et de débats sur les choix technologiques qui devront être faits puisqu'ils engageront l'efficacité de la distribution de l'électricité pour au moins 35 ans. Ils devront permettre de faire face aux fortes augmentations de densité de population en zone urbaine, à une croissance forte, mais difficilement quantifiable de la charge, et faire preuve à la fois d'une grande flexibilité et d'une totale fiabilité. C'est donc un "smart grid" qu'il faut développer, une sorte de "energy internet" comme le propose Roger Anderson, de l'Université de Columbia, qui permette de prévoir les incidents, de gérer le trafic énergétique et ses possibles congestions. Il faut pour cela concevoir une architecture évolutive et reconfigurable, qui s'appuie sur un réseau principal adapté où l'électronique permet d'automatiser, optimiser et contrôler la transmission haute tension et des réseaux secondaires moyenne tension interconnectés, dotés de relais digitaux et de commutateurs intelligents. Plusieurs compagnies de distribution, des sociétés de consultants et des universitaires sont associés dans la réflexion pour la définition de ce réseau du futur.

Les technologies permettant de gérer de manière optimale la distribution d'énergie existent. Elles sont similaires à celles utilisées pour gérer le routage des données sur le réseau internet. D'autre part le consommateur d'électricité deviendra un acteur du futur système de distribution grâce à des systèmes de contrôle interactifs installés dans chaque foyer. Des expériences menées en Californie ont montré que si le consommateur est clairement informé sur les tarifications instantanées et qu'on lui donne les moyens d'acheter son électricité quand bon lui semble la consommation durant les pics diminue significativement. Le contrôle généralisé en temps réel de la consommation du côté utilisateur et du côté producteur permettra de répartir la charge pour éviter des coupures de courant lors des pics de consommation et une sous-activité des centrales en régime d'heures creuses.

Enfin, les progrès attendus dans le secteur des capteurs et des micros dispositifs (miniaturisation, fiabilité, etc.) permettront de développer de nouvelles solutions de contrôle et de mesure.

I.3 Le stockage de l'énergie

La production d'électricité doit répondre en temps réel à la demande, de sorte qu'en dehors des périodes de pic de consommation, les centrales fonctionnent en régime réduit. Cette capacité de production non exploitée en période de faible demande peut être utilisée pour charger des systèmes de stockage qui ensuite aident à répondre aux fortes demandes. Les mêmes systèmes peuvent aussi servir à stocker l'énergie produite par des sources renouvelables (solaire, éolienne, etc.). Il s'agit donc d'un enjeu particulièrement stratégique, avec différentes solutions techniques aux caractéristiques très différentes plus ou moins adaptées aux diverses situations : ce sont les centrales hydroélectriques pompées, qui nécessitent un environnement géographique spécifique, les réserves d'air comprimé dans des cavernes souterraines, les systèmes à volant d'inertie, le stockage magnétique à supraconducteur, le stockage thermique par sels fondus, la production et le stockage d'hydrogène, le stockage chimique avec notamment les différents systèmes de batteries, etc. Arnold Stux du Naval Research Laboratory a fait le point sur les batteries disponibles à l'heure actuelle. Le constat est que les batteries les plus avancées sont beaucoup trop chères pour être utilisées au stockage d'énergie à grande échelle sur le réseau. Même constat de la part du Pr. G. Bothun de l'université de l'Oregon.

Cependant, plusieurs de ces approches pourraient à l'avenir bénéficier des progrès de la recherche, et notamment de l'apport des nanotechnologies, notamment avec la fabrication de nouveaux matériaux composites, l'élaboration d'électrolytes solides ou de nouveaux matériaux d'électrode dans le domaine des batteries.

Les questions de stockage sont aussi fortement reliées à la production d'énergie à partir de sources renouvelables, et quelques orateurs sont intervenus sur les programmes visant à développer le solaire, thermique ou photovoltaïque, ou bien les piles à combustible, domaine dans lequel les nanosciences peuvent permettre des avancées notables. Dans ce cadre, Michael McDowell a décrit un programme de développement assez avancé sur un système de production d'électricité par centrale solaire thermodynamique. La centrale est constituée d'un champ circulaire de miroirs inclinés réfléchissant le rayonnement solaire sur un réservoir de sels fondus placé au sommet d'une tour qui se trouve au centre du système. L'énergie thermique emmagasinée dans le réservoir assure le fonctionnement d'une turbine à gaz. Un prototype de ce type de centrale a montré la viabilité du projet. Deux centrales seront opérationnelles en 2010 en Espagne et en Afrique du Sud. Par ailleurs, l'HARC (Houston Advanced Research Center) travaille au développement et à la commercialisation des piles à combustible. Karl Rabago, Directeur du Groupe Energies propres et renouvelables de l'HARC a fait le point sur les avantages que pourraient apporter les nanotechnologies dans ce domaine, en particulier une amélioration de la catalyse grâce à une augmentation de la surface spécifique et la mise au point de membranes mieux adaptées.

Le domaine des transports a également été abordé, d'une part par le compte rendu d'une étude de l'Université du Delaware en faveur du développement de véhicules électriques qui échangeraient leur énergie avec le réseau, et permettraient ainsi dans les périodes de non utilisation de contribuer à répondre à la demande en électricité, d'autre part par une analyse des bénéfices qui peuvent être attendus du développement de véhicules hybrides électrique - thermique.

Ces journées se sont terminées sur un exposé très apprécié du professeur Stephen Pacala, de l'université de Princeton, qui s'est attaché à montrer que les problèmes interdépendants d'évolution climatique et de production énergétique pouvaient trouver des solutions dans l'état actuel de nos technologies, et qu'il était possible d'agir dès maintenant dans l'objectif de stabiliser le taux de CO₂ de l'atmosphère d'ici le milieu du siècle, sans qu'il soit nécessaire d'attendre une révolution technologique comme le soutiennent certains analystes.

II Commentaires

Cette réunion était enrichissante par son contenu et par la diversité des intervenants. Elle sort du cadre des réunions auxquelles un chercheur scientifique assiste le plus souvent par la participation d'autant de non-scientifiques, d'entrepreneurs de haut niveau ainsi que de personnes impliquées dans la politique de la régulation (la structure américaine étant nettement différente de celle que l'on connaît en France). Le principe de l'atelier est certainement à méditer : mettre ensemble des scientifiques, des économistes et des industriels, afin qu'ils puissent appréhender les différents aspects du problème et confronter leurs analyses, même si au cours de ces deux journées, l'interaction n'a pas semblé encore optimale.

Il est évident que ce séminaire était également motivé par le problème de la dépendance énergétique des Etats-Unis. Ce pays dépense quotidiennement des sommes d'argent gigantesques pour importer du pétrole, sa principale source d'énergie, et ces fonds partent dans des régions du monde qui le plus souvent ne sont pas parmi les plus stables sur les plans politique, militaire, etc. Il s'agit donc de se retourner vers la science et la technologie pour trouver des solutions, sachant qu'il sera bien difficile de choisir une voie unique et qu'on ne pourra pas disposer d'un "nouveau pétrole", produit sur place, que l'on peut aisément stocker et qui soit aussi facile à transporter que l'électricité.

Les deux exposés d'introduction (d'Amy Myers-Jaffe et de Wade Adams) ont donné le ton. L'individu américain consomme annuellement dix fois plus d'énergie qu'un chinois, vingt-cinq fois plus qu'un indien. Cependant, ces deux derniers pays vont avancer et leurs consommations vont bien sûr augmenter également, comme celles de tous les pays en cours de développement. La demande énergétique ne va cesser de croître, et pour y faire face, des progrès technologiques sont indispensables pour améliorer à la fois les rendements et les coûts de production des procédés de substitution (photovoltaïque, piles à combustible, batteries, hydrogène, etc.).

Pour ce qui est de l'électricité, ces deux journées ont vu se confronter les analyses des différents acteurs de la production et de la distribution de cette énergie aux Etats-Unis et des économistes, et permis de mettre en avant les besoins et les progrès nécessaires dans le secteur de l'énergie électrique et de son stockage, ainsi que de mieux appréhender les domaines dans lesquels la recherche scientifique est porteuse d'espoirs.

La politique de recherche énergétique des Etats-Unis a été depuis le début des années 2000 assez clairement orientée vers l'hydrogène¹, censé résoudre à la fois les problèmes de l'environnement et de dépendance énergétique, mais dans une perspective de long terme (2030)². En effet, il n'y a pas pour l'instant de solution exploitable pour stocker l'hydrogène. On peut évidemment penser que cette politique constituait un argument pour différer la signature des accords de Kyoto. Plusieurs orateurs se sont clairement montrés réticents face à une utilisation massive de l'hydrogène (Karni et Luft, bien que ce dernier ait tenu des propos plus proches du fanatisme idéologique que du débat scientifique) et Pacala en a très peu parlé dans un exposé pourtant brillant traitant de la réduction des émissions de CO₂ à l'horizon 2050, mais visant à démontrer que les technologies actuelles étaient adaptées – ou adaptables. On peut en tout cas être surpris du peu de place occupé par l'hydrogène dans les débats.

¹ Déclaration commune de G. Bush et R. Prodi le 25 juin 2003 et les déclarations de S. Abraham au moment de la mise en place de l'IPHE en 2003 (www.iphe.net et www.doe.gov).

² Rapport du DOE en février 2002, toujours disponible sur www.usea.org/DOE%20Hydrogen%20Vision.pdf.

En fait, les présentations auxquelles on a pu assister les 15 et 16 novembre concernaient plutôt la politique énergétique à court et moyen terme, le point de départ étant les insuffisances constatées des réseaux électriques aux Etats-Unis, de sorte que les solutions présentées concernaient principalement la gestion du réseau (stockage de l'électricité, production décentralisée) et les énergies renouvelables (solaire principalement).

S'il est clair que dans plusieurs domaines, les nanotechnologies pourront contribuer à résoudre un certain nombre des problèmes posés, il apparaît qu'il faudra encore du temps et des efforts importants pour voir des applications mises en œuvre au niveau industriel. Quelques acteurs ont décrit divers domaines dans lesquels les nanotechnologies pourraient faire, ou font déjà des contributions. Cependant, malgré le titre du forum et malgré l'intérêt des sujets abordés, il n'y a pas eu beaucoup de discussions approfondies sur ces apports. Dans certaines recherches, la présence du "nano" semble d'ailleurs quasi-absente : énergie éolienne, énergie captée par les flux marins, etc. Plus généralement, on pouvait s'attendre à un plus grand nombre d'exposés consacrés spécifiquement aux nanotechnologies, mais ce manque est peut-être aussi révélateur du gap qui existe encore entre recherche fondamentale et applications. Enfin, les piles à combustibles n'ont été évoquées que d'une façon assez générale, et essentiellement dans l'exposé de Rabago. On doit remarquer à ce sujet que l'amalgame entre pile à combustible et hydrogène conduit souvent (malheureusement) à négliger les perspectives offertes par les piles à combustible haute température dans le cadre de cycle combiné à très haut rendement électrique utilisant du gaz naturel.

Un des aspects souvent oublié dans les analyses est celui du bilan global des nouvelles technologies. Pour évaluer le "gain" de telle ou telle solution, on ne doit pas oublier toute l'énergie éventuellement dépensée pour transformer, modifier, fonctionnaliser ou fabriquer de nouveaux matériaux. Toutes ces étapes exigent aussi de fournir de l'énergie, souvent de manière peu efficace, en particulier si cette énergie est thermique, et il faut la prendre en compte dans le bilan total.

En résumé, les exposés présentés montrent qu'il y a une vraie réflexion en profondeur aux Etats Unis avec un grand nombre de propositions pour rendre le réseau de distribution de l'électricité plus « intelligent » (the smart grid). Sur le plan des nouvelles filières énergétiques, la diversité des domaines abordés atteste que le concept "nouveau pétrole" n'a pas encore trouvé de support technologiquement et économiquement acceptable. Enfin, même si les perspectives offertes par les nanotechnologies sont très attrayantes, il semble que de nombreuses années de recherche soient encore nécessaires avant qu'elles ne soient exploitées au niveau industriel. Pour finir, on notera l'absence totale des pétroliers texans malgré la tenue de cette réunion à Houston. Il faut dire que l'on trouve encore à Houston un certain nombre de livres qui soutiennent l'idée qu'il n'y aura jamais de problème dans l'avenir à cause d'un manque de pétrole !

III Programme détaillé du Forum Energie et Nanotechnologie

On trouvera ci-dessous un bref résumé de chacune des conférences présentées en séance plénière. Les documents présentés par les conférenciers peuvent être consultés sous la forme de fichiers Powerpoint ou PDF sur le site internet du Baker Institute à l'adresse URL suivante :

http://cohesion.rice.edu/centersandinst/cnst/conference_baker.cfm

II.1 Problématiques politiques, économiques et législatives

Mr. Jesse Berst, President, Center for Smart Energy

Has the Moment Come? When (and Why) the Smart Grid Will Reach the Tipping Point

Jesse Berst s'est évertué à démontrer que le moment est venu d'entamer une réorganisation complète du réseau électrique pour le transformer en réseau intelligent ou « smart grid ». Il souligne le sous-investissement réalisé dans les infrastructures depuis les 30 dernières années. Entre 1975 et 2004 la demande a plus que doublé tandis que les investissements dans le réseau de distribution ont chuté de 50%. Beaucoup d'installations sont arrivées au maximum de leur capacité ce qui a conduit à de multiples pannes sur le réseau qui ont coûté plus de 100 milliards à l'économie américaine en 2005. H. Berst milite pour une nouvelle campagne d'investissement qui s'accompagne d'une réflexion sur un changement d'architecture du réseau. Au lieu d'un développement extensif des capacités actuelles, il juge préférable d'investir dans les technologies silicium qui permettront d'utiliser plus efficacement les ressources disponibles.

Les nouvelles réglementations en vigueur vont aussi dans le sens d'un réseau intelligent. L'« Energy Bill 2005 » exige une meilleure fiabilité et sécurité du réseau et propose d'équiper les consommateurs avec les outils pour mieux gérer leur consommation (smart metering). D'autre part, certains Etats américains ont mis sur pied des réglementations pour la lutte contre le réchauffement climatique. Ce nouveau cadre législatif est un argument supplémentaire pour le passage à un réseau intelligent.

Jesse Berst a fini son exposé en insistant sur l'opportunité que représente ce nouveau marché. De la même manière que l'industrie des télécoms a fait sa révolution pour passer dans l'ère digitale, l'industrie de l'énergie (la plus importante du pays) va connaître de grands changements. De nouveaux leaders pourraient émerger de cette révolution attendue. Des sommes colossales, de l'ordre de 100 milliards de dollars, devront être investies mais l'enjeu est de taille puisque l'économie américaine dépend du bon fonctionnement du réseau.

Dr. Roger Anderson, Director, Thomas Edison Center for Computational Learning Systems, Columbia University

Grid Intelligence, Nano Computers and Sensors, and Rick Smalley's Vision of Energy Abundance for All

Dr. Anderson a présenté les concepts d'un réseau intelligent. Il s'agit en fait de bâtir un 'Internet' de l'énergie. Au lieu de l'architecture rigide du réseau actuel où les utilisateurs finaux reçoivent leur électricité selon un canal de distribution statique, le réseau de demain sera gérer le routage dynamique du trafic de l'électricité de la même manière que le réseau internet gère les flux de

données. Une architecture en toile permettra une gestion dynamique des congestions et des pannes. Comme pour l'internet, les nœuds du réseau devront être capable de rediriger automatiquement et en temps réel le flux d'électricité selon les conditions du réseau. Une telle architecture rendra le réseau flexible, réactif, fiable, efficace et à l'abri de panne généralisée. Les technologies nécessaires pour un réseau intelligent existent déjà. La balle semble aujourd'hui dans le camp des politiques.

Dr. Peter Hartley, Baker Institute, Rice University

What is the right policy to propel innovative solutions?

Le '2005 Energy Bill', signé par le président Georges W. Bush en août 2005, pose le cadre de la politique énergétique des Etats-Unis. De nouveaux standards de fiabilité et de sécurité sont imposés à l'industrie de la distribution d'énergie. Parmi les innovations proposées, P. Hartley s'est concentré sur les systèmes de mesures intelligents (smart metering). Il s'agit d'équiper les utilisateurs finaux avec un appareillage électronique leur donnant la possibilité de connaître le prix de l'électricité en temps réel et de pouvoir adapter leur consommation. Aujourd'hui, presque tous les consommateurs d'électricité aux Etats-Unis reçoivent une tarification unique ou une simple différenciation heures de pointe/heures creuses qui tient très peu compte des variations journalières (voire horaires) du prix réel. Le problème fondamental est que la demande n'est pas du tout réactive à la variation des prix. Cette inélasticité de la demande couplée à l'inélasticité de la production durant les pics de consommation (les centrales sont à plein régime et il n'existe pas de moyen de stockage de l'électricité) conduisent à des situations critiques dont les conséquences sont une inflation du prix de l'électricité et des pannes de réseau. L'application d'une tarification en temps réel, qui indique au consommateur final, sur une base horaire, quand l'électricité est plus ou moins chère à consommer, allégerait significativement les charges que le réseau a de plus en plus de mal à supporter.

Dr. Frank Wolak Professor of Economics, Stanford University

The Benefits of Load as a Strategic Resource in Wholesale Electricity Markets

Dans presque tous les marchés sauf celui de l'électricité, la participation du consommateur limite la capacité des fournisseurs à augmenter leur prix à travers leurs actions unilatérales. La législation actuelle (régulée par la Federal Energy Regulatory Commission (FERC)) limite la liberté d'action du consommateur face à sa consommation. Ce que propose Dr. Frank Wolak, et qui est repris par plusieurs conférenciers, c'est un changement du cadre législatif aux Etats-Unis pour permettre un 'real-time pricing' ou tarification en temps réel. Il s'agit de contrôler l'occupation du réseau dont les fluctuations se répercuteront sur le prix de l'électricité. Le consommateur aura les outils nécessaires pour choisir son mode de consommation en fonction du prix communiqué. Pr. Wolak s'appuie sur l'exemple du Royaume-Uni qui utilise déjà cette tarification pour les consommateurs industriels dont la réponse s'est montrée très positive. Il s'agit en fait d'un moyen simple pour les consommateurs de réduire leur facture en adaptant leurs horaires de consommation. L'avantage est loin d'être évident pour les producteurs d'électricité qui réalisent d'importants profits lors des pics de consommation. C'est pourquoi un cadre législatif est nécessaire pour l'application d'une tarification en temps réel.

Dr. John Stringer, Former Technical Executive, Science and Technology Development Division, Electric Power Research Institute (EPRI)

The Challenge for the Grid of the 21st Century

Dr J. Stringer a présenté en détails l'état actuel du réseau américain. Le réseau est constitué de 3 réseaux indépendants, un à l'est (2/3 des USA plus le Canada), un au Texas et un à l'ouest (le reste des USA). Les réseaux sont alimentés en courants alternatifs à 60 Hz et sont connectés entre eux par des liaisons en continu (DC). La capacité de production des centrales américaines couvre quasiment deux fois la consommation moyenne. Cependant les pics de consommation rendent le réseau instable depuis 1998 avec un nombre croissant de pannes affectant de larges populations. Le réseau n'a pas été conçu pour supporter les charges actuelles. L'instabilité du réseau s'est aussi aggravée depuis la dérégulation du marché de l'électricité. Les Etats-Unis sont toujours sous la menace d'un 'blackout' majeur.

Les pertes en ligne dues à la distribution et la transmission de l'électricité sont passées de 5% en 1970 à 9.5% en 2001 en raison de l'augmentation du trafic et des congestions. Sur une consommation annuelle de 3840 TWh en 2002 près de 380 TWh ont été perdus principalement par perte ohmique soit 2/3 de la production française d'électricité (559TWh en 2002 [1]). Un autre problème technique vient de la dilatation thermique du cuivre qui produit un affaissement des câbles jusqu'à toucher le sol. Ce phénomène est responsable de nombreuses pannes sur le réseau et limite l'utilisation de câbles non supportés sur de longues distances. Une autre limitation imposée par le câblage en cuivre est la densité de courant transportable. Pour alimenter de larges agglomérations la seule solution disponible aujourd'hui est de multiplier le nombre de fils électriques. Des solutions technologiques pour chacun des ces problèmes sont à l'étude mais ne seront pas disponibles à grande échelle à court terme (voir II.2).

Les postes de consommation peuvent être classés en 4 catégories : le refroidissement, les moteurs, le chauffage, l'éclairage et tout ce qui relève du traitement de l'information ('computing') (cf. tableau 1). Il est estimé que 2/3 de l'électricité produite sont consommés par des moteurs électriques présents sous une forme ou sous une autre dans la plupart des appareillages électriques.

Consommation de l'électricité aux Etats-Unis	
Refroidissement	30 %
Moteurs d'entraînement	25
Chauffage	18
Eclairage	16
'computing'	10

Figure 1- Postes de consommation de l'électricité aux USA

J. Stringer finit son exposé en présentant le 'continental supergrid' ou super-réseau continental dont la nouvelle approche pourrait résoudre certains des problèmes actuels. La colonne vertébrale du système est composée de lignes de transport DC (courant continu) supraconductrices le long desquelles sont installées les centrales de production. La localisation des centrales importe peu puisque aucune énergie n'est perdue dans les supraconducteurs. A l'échelle locale l'électricité est convertie en courant alternatif avant d'être distribué aux consommateurs.

II.2 Innovations technologiques pour augmenter la capacité et l'efficacité du réseau

Dr Gregory J. Yurek, Chief Executive Officer, American Superconductor Corporation
Superconductors for advanced grid solutions.

La société American Superconductor Corporation (AMSC) (17 ans d'existence, plus de 250 employés) développe la technologie des câbles supraconducteurs. Découverts en 1911, les matériaux supraconducteurs ne possèdent aucune résistance électrique en dessous d'une température critique. Affranchi de l'échauffement inhérent à la résistance, les supraconducteurs peuvent supporter des densités de courant beaucoup plus importantes que le cuivre. Le refroidissement cryogénique est la principale difficulté technologique pour l'utilisation des supraconducteurs comme vecteur de distribution sur le réseau. Une opération pilote (600 m de câble) est en cours à Long Island et plusieurs projets ont été initiés à travers le monde. AMSC propose aussi des moteurs de 36 MW pour la propulsion des navires. Avec l'utilisation des supraconducteurs, la taille du moteur est réduite de plus de moitié et le poids divisé par 3 pour la même puissance.

Dr. Paul Chu University of Houston, University of Hong Kong
Superconductivity, Nanotechnology, and Energy

P. Chu, de l'université de Hong Kong, a conduit un exposé sur l'état de l'art des supraconducteurs et les tentatives récentes d'amélioration du courant critique par implantation de nanodéfauts. Le meilleur conducteur haute-température, $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ a une température de transition supra de 134K à pression ambiante et 164K à 30Gpa. Des espoirs existent toujours de trouver un jour un matériau supraconducteur à température ambiante.

Dr. Howard Schmidt, Executive Director, Carbon Nanotechnology Laboratory, Rice University

Developing the Quantum Wire

Les supraconducteurs nécessitent trop de contraintes techniques (refroidissement à l'azote liquide) pour pouvoir rivaliser avec le cuivre à grande échelle. De grands espoirs sont placés sur la mise au point de câbles en nanotubes de carbone. Ces cylindres de graphène, de quelques nanomètres de diamètre et jusqu'à plusieurs centimètres de long, sont synthétisés en laboratoire puis filés ensemble pour former un câble. L'équipe de Rice University a obtenu un contrat de 11 millions de dollars avec la NASA pour produire 1m de câble en nanotubes de carbone d'ici 2008. Les exceptionnelles propriétés de nanotubes promettent des câbles plus résistants, meilleurs conducteurs, acceptant une densité de courant beaucoup plus importante sans souffrir d'une dilatation thermique excessive. Les chercheurs sont à l'heure actuelle confrontés à la difficulté de sélectionner les nanotubes conducteurs de type métallique (chiralité « armchair ») parmi les différents nanotubes produits (métalliques, semi-métalliques et semi-conducteurs).

Dr. Alan Windle, Chair of Materials Science, University of Cambridge, United Kingdom
Spinning Carbon Nanotube Wire

Alan Windle (Cambridge University) a présenté une technique de filage en continu des nanotubes directement en sortie du four de production sans étape intermédiaire. A l'heure actuelle, le système développé en laboratoire permet de produire en continu des fibres de nanotubes de quelques dizaines de microns de diamètre et de pratiquement 100 m de long. Pour donner une image, le procédé de tirage ressemble à la fabrication de la « barbe à papa ».

Dr. Ray Baughman, Director, NanoTech Institute, Univ. of Texas at Dallas
Carbon Nanofiber Yarns and Sheets and Alternative Materials for Energy Generation, Storage, and Transmission

L'équipe du Professeur R. Baughman a mis au point un procédé de filage, adapté des techniques traditionnelles du filage de la laine, qui permet de former des fils faits de nanotubes de carbone multiparois. Ces fils de quelques microns de diamètre sont particulièrement solides, très résistants à l'étirement et extrêmement flexibles, au point qu'il est possible de faire des boucles et des nœuds qui ne les fragilisent pas. Il est ainsi possible de réaliser des tissus à base de nanotubes de carbone, que Baughman propose d'utiliser pour réaliser des supercapacités, des tissus conducteurs utiles pour la réalisation d'électrodes souples, et très attractifs pour le stockage de l'énergie.

**Dr. Edward McRae, Director of Research, Centre National de la Recherche Scientifique
Laboratoire de Chimie du Solide Minéral, University of Nancy, France.**
Nanostructured Carbon for Energy

Dr. McRae a dressé un tableau des différentes formes de carbone parmi lesquelles il distingue les formes "ordonnées" telles que le diamant, le graphique, les fullerènes, les nanotubes et les formes "désordonnées" telles que le carbone amorphe, les fibres de carbone, l'antracite, le carbone activé...etc. La nanostructuration de ces différents matériaux augmente leur surface spécifique, et par là même renforce leur réactivité. Les applications telles que les supercapacités, les supports catalytiques, le stockage gazeux, les électrodes pour les piles à combustibles et les batteries lithium ion tirent avantage de cette nanostructuration qui améliore leur performances. Par exemple les nanotubes sont de bons candidats pour le stockage d'hydrogène, le carbone activé pour le stockage de méthane et le graphite exfolié pour la catalyse.

II.3 Stockage de l'énergie

De nombreux participants à la conférence ont abordé le problème du stockage d'énergie. Les systèmes actuels ne répondent pas à aux besoins du réseau. Trop coûteux, trop encombrants ou simplement trop limités, aucun système n'est à ce jour capable de stocker l'énergie nécessaire pour supporter le réseau lors des pics de consommation. Le stockage est ainsi au cœur du développement des énergies renouvelables qui sont souvent par essence intermittentes.

Dr. Greg Bothum, Professor of Physics and Environmental Science, U. of Oregon

A Choice Matrix for Scalable Energy Storage

Le Dr. Bothum s'est livré à un examen critique des différentes méthodes de stockage de l'énergie par rapport à un objectif bien déterminé : le stockage de 50 GW par heure soit approximativement 10% de la consommation horaire aux Etats-Unis. Parmi les technologies qui peuvent être envisagées dans cet objectif, on trouve les pompes hydrauliques, les batteries (Li-ion, Ni-MH...etc.), le stockage par air comprimé (CAES), le stockage magnétique en supraconducteur (SMES), les volants d'inertie (flywheels), les supercapacités. Toutefois, la conclusion est qu'il n'existe pas de solution unique à grande échelle à partir des technologies actuelles.

Mr. Michael W. McDowell, Program Manager, Solar Power System, Pratt & Whitney Rocketdyne

Solar Power Technology: Large Scale Storable and Dispatchable Solar Energy

M. McDowell a présenté un programme de production d'électricité par centrales solaires thermodynamiques à tour. La centrale est constituée d'un champ circulaire de miroirs inclinés réfléchissant le rayonnement solaire sur un réservoir de sels fondus placé au sommet d'une tour qui se trouve au centre du système. Cette solution permet de stocker l'énergie sous forme thermique (sel fondu) et ainsi d'adapter la production à la demande (facteur de charge de 65% avec un stockage de 16h). Des prototypes de centrales de 15 et 100 MW sont en cours de réalisation. L'objectif est de produire un kWh au coût de 5 c\$ d'ici 10 à 15 ans.

Dr. Karl Rabago, Group Director, Clean and Renewable Energy, Houston Advanced Research Center

Nanotechnology Role in Accelerating the Hydrogen Economy

Le Houston Advanced Research Center (HARC) est un organisme à but non lucratif dont l'objectif est de développer les technologies pour un développement durable et la protection de l'environnement. Au sein du groupe pour les énergies propres et renouvelables, des recherches sont menées sur les piles à combustible. L'HARC soutient la commercialisation des piles, propose un support technique et conduit des tests sur les différentes technologies disponibles. Des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années en ce qui concerne la fiabilité, la simplicité, le prix et la taille. Les piles PEM (proton exchange membrane) en particulier ont connu un développement important. Un des challenges des nanotechnologies pour les piles à

hydrogène est la mise au point de catalyseurs pour les électrodes afin de remplacer le platine qui est extrêmement coûteux.

Dr. Arnold Stux, Materials Research Engineer, Naval Research Laboratory

Nanomaterials for Battery Applications

Les performances d'une batterie se jugent à son énergie spécifique (Wh/kg), c'est à dire la quantité d'énergie stockable, sa puissance spécifique (W/kg) et sa durée de vie. Parmi les nombreuses technologies disponibles, celles délivrant une forte puissance spécifique (NiMH, Li-ion...) ont en général une faible énergie spécifique et vice-versa. Cette caractéristique pose une sérieuse limitation pour le stockage de l'électricité pour le réseau. D'autre part, aucune technologie ne peut aujourd'hui emmagasiner de grandes quantités d'énergie sans un coût prohibitif. Dr. Stux a passé en revue les différentes technologies de batteries (Plomb-acide, Sodium-sulfure, Li-Ion...) et questionné l'apport des nanomatériaux dans l'amélioration des performances. Si d'un côté les nanomatériaux augmentent la vitesse de charge et décharge, ils peuvent aussi s'avérer responsables d'effets parasites tels que des réactions secondaires entre électrodes-électrolytes, l'autodécharge et la réduction de l'efficacité des cycles. Ces effets néfastes ne sont cependant pas systématiques et dépendent des matériaux utilisés.

Dr. Amit Singhal, Chief Scientist, NEI Corporation

Nano-structured Electrode Materials for Energy Storage Devices,

Dr. Amit Singhal a lui aussi présenté le bilan des matériaux disponibles pour les batteries et les avantages qu'apportent les nanotechnologies dans la conception des électrodes. Des alliages du type $\text{Li}_x\text{Ni}_y\text{CO}_z$ AlO_2 , Li_xTiO ou WO_2 nanostructurés sont à l'étude chez NEI qui ont déjà permis d'obtenir des résultats prometteurs.

Dr. Raymond Beach, Lead Systems Engineer, Advanced Electrical Systems Branch, Glenn Research Center, NASA

NASA Applications for Flywheels,

Dr. Raymond Beach travaille sur les applications des volants d'inertie (flywheels) à la NASA. Un système de stockage de ce type est actuellement à l'étude pour une utilisation dans une mission lunaire. Des volants d'inertie servent à stocker sous forme mécanique l'énergie électrique produite par les panneaux solaires qui ne peuvent pas être productifs lorsque le module lunaire se trouve dans une zone d'ombre. Avec 20 unités tournant entre 83 000 et 250 000 rpm, le système à l'étude, d'un poids de 8 tonnes pourra stocker 10 600 kWh délivrant une puissance de 30 kW pendant 14.75 jours. L'utilisation de nanotubes est envisagée pour réaliser un rotor en composite.

Dr. Jasna Tomic, Postdoctoral Fellow, University of Delaware
Using Electric Vehicles for Grid-Connected Storage

Le parc automobile mondial représente une capacité de stockage d'électricité non négligeable si l'on additionne la capacité de chaque batterie. Dr. Jasna Toni propose d'utiliser les voitures électriques, hybrides ou à pile à combustible, capables de générer un courant alternatif, pour les connecter au réseau et les utiliser en tant que réservoir d'énergie. L'idée est de brancher sur le réseau les voitures lors de leur stationnement pour offrir une capacité de stockage flexible. D'une part, le parc automobile peut fournir de l'électricité au réseau lors des pics de consommation, d'autre part, il peut stocker de l'énergie provenant de sources intermittentes tels que le solaire et l'éolien. Des expériences pilotes ont été menées sur une flotte de 100 voitures à New York et de 205 voitures en Californie. L'expérience semble positive et économiquement viable grâce à la revente d'électricité mais un tel système demande une quantité critique de voitures connectées pour pouvoir sérieusement supporter et stabiliser le réseau.

Dr. Gal Luft, Executive Director, Institute for the Analysis of Global Security (IAGS)
Electrifying Transportation: The Case for Plug-In Hybrids

G. Luft milite pour l'indépendance des USA par rapport aux importations de pétrole. Il propose que les consommateurs puissent avoir le choix de leur 'carburant', électricité, alcool ou essence. Il se déclare clairement « anti hydrogène », affirmant que les limitations techniques et le prix de revient rendent les piles à combustibles non-compétitives.

Dr. Stephen Pacala, Princeton University
*Solving the Climate and Energy Problem:
Available Technologies and Policy Frameworks*

Cet exposé brillant du Professeur S. Pacala (Princeton) venait conclure les deux journées de conférences. Selon l'orateur, la politique énergétique mondiale doit répondre à trois questions interdépendantes : l'épuisement des ressources pétrolières, la pollution de l'air et le changement climatique. L'enjeu est donc de pouvoir assurer la fourniture d'énergie à l'horizon 2050 tout en stabilisant les émissions de gaz à effet de serre (qui vont doubler si on ne fait rien). Sur les voies possibles et les solutions à mettre en place, S. Pacala ne propose pas de révolution, mais requiert une mobilisation générale pour qu'on exploite et adapte les technologies existantes qui selon lui devraient être suffisantes (dé-carbonisation de l'énergie, énergies renouvelables et naturelles, diminution des pertes, augmentation des rendements, etc.) si une politique volontariste d'investissement est mise en place très rapidement.