



**HAL**  
open science

## Enjeux énergétiques et défis mécaniques

Jean Salençon

► **To cite this version:**

Jean Salençon. Enjeux énergétiques et défis mécaniques. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03378519

**HAL Id: hal-03378519**

**<https://hal.science/hal-03378519v1>**

Submitted on 14 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Enjeux énergétiques et défis mécaniques

Jean **SALENÇON**

Laboratoire de mécanique des solides, École polytechnique, CNRS.

Académie des sciences, Académie des technologies.

### Résumé

*Comme l'ont rappelé des déclarations internationales récentes, l'approvisionnement en énergie de la population mondiale est un problème majeur posé par l'accroissement de la demande, par la raréfaction de certaines ressources fossiles, et contraint par les exigences éthiques et environnementales qui s'affrontent souvent à celle de la rentabilité des investissements. Le concept actuellement privilégié pour les prochaines décennies est celui de Mix énergétique qui, reconnaissant la diversité des besoins et des ressources, admet comme indispensable le recours aux énergies fossiles et à l'énergie nucléaire tout en recommandant la recherche d'une économie « à bas carbone », notamment au moyen des énergies renouvelables. Plusieurs aspects essentiels de ces nouveaux enjeux interpellent les mécaniciens dans divers aspects de la discipline. Ainsi, la recherche d'une meilleure utilisation de l'énergie conduit à la remise en cause de la conception et de l'efficacité réelle des systèmes et des moyens de transport. Pour l'utilisation des ressources fossiles la recommandation porte sur la mise en œuvre de la Capture et du stockage du carbone (CCS), qui appelle des analyses mécaniques de la tenue et de l'étanchéité à long terme des réservoirs souterrains de stockage du gaz carbonique et du comportement des aquifères profonds, indispensables à l'acceptabilité sociale du procédé. La prochaine génération de réacteurs nucléaires, susceptible d'apporter un élément de solution au problème des « déchets », est dépendante des recherches scientifiques et techniques concernant les matériaux nécessaires à sa construction. L'énergie éolienne suscite, par la taille de ses équipements, des recherches en aérodynamique, aéraulique, fatigue des matériaux, stabilité des structures afin d'en accroître le facteur de disponibilité. L'énergie photovoltaïque, quant à elle, s'apprête à un saut technologique par l'utilisation de cellules photovoltaïques en couches minces sur la base de matériaux organiques et polymériques nanostructurés. Enfin, l'intermittence de la majorité des énergies renouvelables, outre le développement de « réseaux intelligents », impose pour que ces énergies puissent, à terme, être un substitut valable aux énergies fossiles et à l'énergie nucléaire, le développement des stockages d'énergie, parmi lesquels les stockages « mécaniques » gardent toute leur importance. Les défis ainsi posés aux mécaniciens s'accompagnent de la nécessité de la formation de compétences au niveau international.*

**“For every problem there’s a solution, short, simple and wrong”**

H. L. MENCKEN

## 1. Un sujet d’actualité

L’année 2009 a vu la question énergétique prendre une importance médiatique nouvelle. Il est clair que le changement survenu dans l’administration états-unienne après l’élection de novembre 2008 est à l’origine de ce surcroît d’intérêt comme en témoigne le discours inaugural du Président OBAMA [1] où, dans le style volontiers incantatoire qu’on lui connaît, celui-ci promettait : *“We will harness the sun and the winds and the soil to fuel our cars and run our factories”* détaillant ainsi un catalogue des énergies “renouvelables”. Quelques mois plus tard, le 27 avril, devant la *National Academy of Science*, la *National Academy of Engineering* et le *National Health Institute*, le même président OBAMA déclarait [2] :

*“...In no area will innovation be more important than in the development of new technologies to produce, use, and save energy -- which is why my administration has made an unprecedented commitment to developing a 21st century clean energy economy, and why we put a scientist in charge of the Department of Energy...”*<sup>1</sup>

*“...Our future on this planet depends on our willingness to address the challenge posed by carbon pollution. And our future as a nation depends upon our willingness to embrace this challenge as an opportunity to lead the world in pursuit of new discovery.*

*“But energy is our great project, this generation's great project. And that's why I've set a goal for our nation that we will reduce our carbon pollution by more than 80 percent by 2050. And that is why -- (applause) -- and that is why I'm pursuing, in concert with Congress, the policies that will help meet us -- help us meet this goal.”*

On ne s’étonnera pas de ce que cette volte-face américaine par rapport à l’ère précédente ait permis aux chefs d’états du G8 réunis à l’Aquila, d’adopter une déclaration volontariste très détaillée, avec des objectifs chiffrés concernant l’amplitude du réchauffement climatique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre à l’horizon 2050. La déclaration du G8+5, qui suivit, fut plus concise :

*“We will encourage and facilitate the development, dissemination and mutually agreed transfer of clean, low-carbon technologies, reducing carbon emissions and increasing energy efficiency from production to consumption, thereby improving energy security and access. We reconfirm our political will for reaching a comprehensive, fair, effective, agreed outcome, following the principle of common but differentiated responsibilities and respective capabilities at the UN Framework Convention on Climate Change Conference in Copenhagen in December.”*

---

<sup>1</sup> Il s’agit de Steven Chu, Prix Nobel de Physique 1997, qui a présidé le groupe d’étude de l’IAC (InterAcademy Council), constitué de quinze membres (Autriche, Brésil, Canada, Chine, Égypte, États-Unis, Inde, Iran, Japon, Kenya, Royaume Uni, Russie, Suède), auteur du rapport *Lighting the Way : Towards a Sustainable Energy Future*, publié le 22 octobre 2007.

La rédaction de ce texte, où l'on remarque la seule référence aux technologies dites « à bas carbone », ne doit évidemment rien au hasard : elle traduit la prise en compte des points de vue des pays du G5, parmi lesquels la Chine et l'Inde.

L'objet de cette présentation est de recenser les principaux enjeux énergétiques, réalistes pour les prochaines décennies, conséquences de cette « nouvelle donne » et d'examiner quels défis sont ainsi posés dans les domaines de la mécanique contemporaine.

## 2. Les éléments de la problématique

Quelles sont donc les raisons des nouveaux enjeux dans le domaine de l'énergie ? Les premiers éléments de réponse sont fournis par quelques constats majeurs, qui sont actuellement largement, sinon unanimement acceptés :

- La demande énergétique croissante en provenance des pays en développement et des pays émergents (Figure 1) ;
- Les besoins énergétiques des pays industrialisés ;

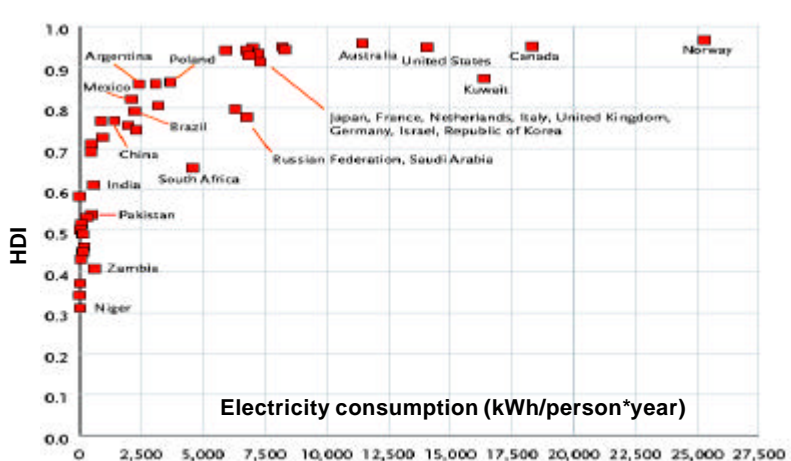


Figure 1. Indice de développement humain en fonction de la consommation électrique 2003-2004, [3].

- La raréfaction, voire l'épuisement annoncé, de certaines ressources énergétiques actuellement prédominantes : c'est la notion de *Peak Oil* introduite par M. KING HUBBERT [4] (Figure 2), également déclinée désormais en *Peak Gas* ;

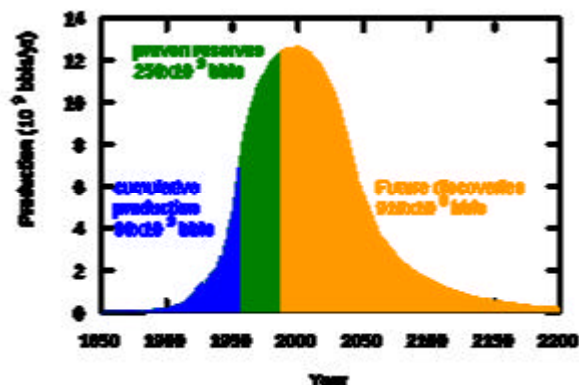


Figure 2. Courbe de production en cloche telle que suggérée originellement par M. KING HUBBERT en 1956.

- L'acidification des océans due à la production de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), dont les conséquences sont énoncées dans la récente déclaration de l'InterAcademy Panel (IAP) :

*“At current emission rates models suggest that all coral reefs and polar ecosystems will be severely affected by 2050 or potentially even earlier;*

*Marine food supplies are likely to be reduced with significant implications for food production and security in regions dependent on fish protein, and human health and wellbeing;*

*Ocean acidification is irreversible on timescales of at least tens of thousands of years;*

*Even with stabilisation of atmospheric  $\text{CO}_2$  at 450 ppm ocean acidification will have profound impacts on many marine systems. Large and rapid reductions of global  $\text{CO}_2$  emissions are needed globally by at least 50% by 2050.”*

- Enfin, évidemment, le changement climatique tel que prévu par les modèles, dû à l'augmentation de l'effet de serre provoqué par le dioxyde de carbone, et les conséquences économiques et sociales que l'on en prévoit (Figures 3 et 4).

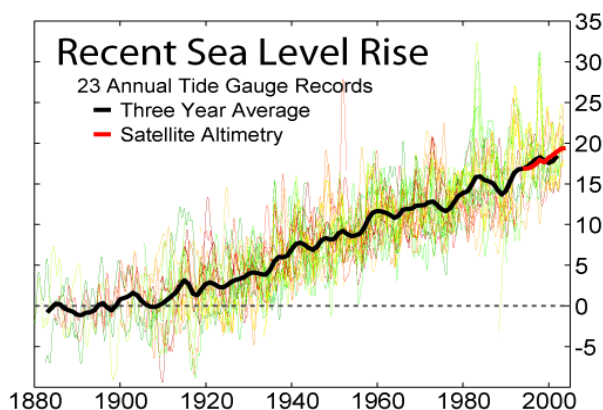


Figure 3. Élévation du niveau de la mer (en cm) durant la période 1882-2005 d'après les relevés en 23 sites sélectionnés par DOUGLAS (1997), [5].

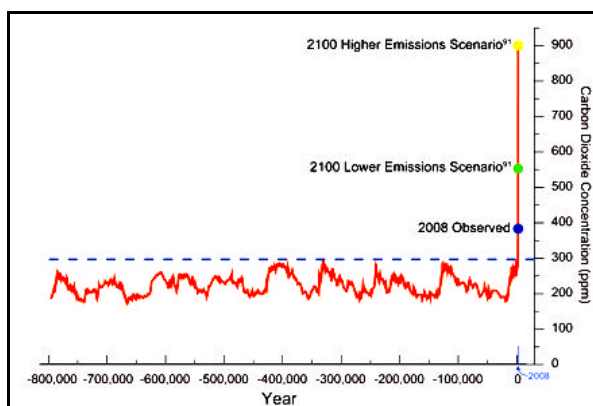


Figure 4. Évolution de la concentration de dioxyde de carbone sur 800 000 ans  
(extrait du rapport *Global Climate Change Impacts in the United States*,  
United States Global Change Research Program, June 16, 2009, [6]).

On sait que les critiques sur ce dernier constat, qui est accepté par la grande majorité des spécialistes en climatologie, portent sur la pertinence des modèles climatiques et sur la part trop importante qui serait attribuée aux causes anthropiques<sup>2</sup>. C'est ici un premier défi posé aux mécaniciens spécialistes de l'enveloppe fluide de la Terre : poursuivre l'amélioration des modèles et des simulations climatiques, à partir de l'approfondissement de la connaissance de tous les phénomènes physiques, chimiques, biologiques complexes qui entrent en jeu dans l'absorption du dioxyde de carbone par la biosphère et dans l'effet de serre lui-même, afin de mieux évaluer l'impact réel des mesures que l'on sera amené à proposer.

À partir de ce recensement, les enjeux énergétiques pour les prochaines décennies se situent sur trois plans principaux :

- Tendre à une meilleure production et à une meilleure utilisation de l'énergie sous toutes ses formes et dans toutes ses applications en évitant les gaspillages et en améliorant les rendements ;
- En l'état actuel des besoins et des ressources, qui oblige de recourir aux énergies fossiles, développer les études pour la réduction des émissions de dioxyde de carbone par la réalisation efficace de dispositifs de capture et de stockage économiquement viables ;
- Développer de nouvelles ressources énergétiques à caractère durable, essentiellement renouvelable.

### 3. Mieux "Utiliser" l'énergie ...

La courbe en G de la Figure 1 (communiquée par le Dr. Robert CREWE [3]), qui ébauche une relation entre un « indice de développement humain » et une consommation énergétique annuelle par habitant pour une trentaine de pays, est évidemment biaisée puisqu'elle ne prend en compte que l'électricité (nous rappelant ainsi une célèbre formule de Lénine !) ; elle n'en est pas moins instructive car il est clair que l'adjonction d'autres formes d'énergie ferait tout au plus disparaître certaines disparités entre

<sup>2</sup> D'autres critiques [7] contestent les conséquences mêmes du changement climatique en niant leur caractère dramatique.

pays développés mais conserverait, voire accentuerait, le fossé entre pays développés et pays en développement. Elle appelle quelques commentaires évidents :

- la partie approximativement verticale de la courbe fait apparaître le besoin inexorable d'un accroissement de la consommation énergétique dans les pays en développement et/ou émergents et donc une demande croissante prévisible ;
- la partie horizontale impose, à tout le moins, une stabilisation sinon une réduction de la consommation énergétique dans les pays développés.

L'utilisation de l'énergie de façon durable fait appel à toutes les mesures propres à favoriser les économies d'énergie, soit en évitant les gaspillages autrefois encouragés par les producteurs eux-mêmes dans les pays industrialisés, soit en recherchant la meilleure efficacité des équipements et des procédés dans l'industrie, l'élaboration des matériaux, le bâtiment et les travaux publics, l'agriculture, la pêche, les transports, etc. À titre d'exemple, la Chine [8] a mis en place un corpus légal sous la forme d'une loi publiée le 1<sup>er</sup> avril 2008 sur la conservation de l'énergie et s'engage dans la restructuration de ses équipements industriels pour en améliorer les rendements, en même temps que pour en réduire les émissions de dioxyde de carbone.

Dans les pays développés, la recherche de l'utilisation durable de l'énergie dans le domaine des transports amène, à une révision des moyens et des réseaux qui, contrainte par les habitudes de vie, par l'aménagement du territoire, par les systèmes économiques et par le simple objectif de rentabiliser les investissements, n'aura pleinement effet que sur des décennies en bénéficiant des progrès techniques. Il est alors essentiel de poursuivre les recherches pour accroître l'efficacité énergétique de tous les moyens de transport – fret, individuels, collectifs – notamment par des ruptures technologiques, compte tenu de leur efficacité économique réelle. Le problème se pose évidemment de façon bien différente dans les pays émergents : la Chine compte actuellement 50 000 kilomètres d'autoroutes et en construit 5 000 par an [7], en même temps qu'elle s'engage dans le développement de la « liquéfaction » du charbon par la construction de démonstrateurs pour la production de carburants et autres dérivés. Autant de décisions qui indiquent la volonté du gouvernement chinois d'améliorer le transport routier indispensable à son développement. L'intérêt porté au plan mondial à la production de biocarburants, sur laquelle on reviendra dans la suite, est évidemment lié à l'importance des transports dans l'économie actuelle.

Dans les pays européens, quoique son impact réel soit farouchement contesté par certains [7], le transport par voie ferrée fait partie du portefeuille de mesures retenues pour lutter contre l'augmentation de l'effet de serre. Les recherches sont menées pour la meilleure gestion de l'énergie dans les calculs de marche à travers la modélisation des chaînes de traction en même temps que l'on tente d'ajuster la consommation électrique à la production et de développer les stratégies de récupération d'énergie au freinage [9]. Le développement de la Grande Vitesse a conduit à lancer en 2005 le projet de recherche AOA (*Aerodynamics in Open Air*) sur les écoulements d'air sous la caisse et sur les effets des vents traversiers, qui associe des calculs de mécanique numérique des fluides et de mécanique des milieux granulaires [9]. Avec le développement de la production de biocarburants de deuxième génération, l'examen du « bilan carbone » des modes de traction peut conduire à

privilégier le mode de traction diesel-électrique qui est, en outre, indépendant des évolutions possibles du coût du cuivre dues à sa raréfaction.

Le transport routier, emblématique de l'ère du pétrole, se trouve, pour cette même raison, interpellé par la « nouvelle donne ». On sait les progrès considérables qui ont été faits par les motoristes « essence » et « diesel ». L'objectif fixé par des normes européennes concernait en premier lieu les émissions de polluants nuisibles à la santé tels que les Oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) et les particules tandis que la réduction des émissions de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) n'apparaissait que comme le signe de la réduction de consommation, recherchée sans référence à l'effet de serre. Les progrès ont été le fruit de recherches poussées sur l'aérodynamique interne par la simulation numérique des écoulements et de la cinétique de combustion. Il est juste de dire que le problème des émissions de nanoparticules par les moteurs à haute pression est d'une actualité que l'on peut qualifier « d'imminente » avec le débat national sur les nanotechnologies qui va avoir lieu dans les mois prochains dans notre pays. Les recherches, un temps mises en sommeil chez les constructeurs automobiles, concernant les véhicules électriques ou les véhicule hybrides retrouvent toute leur importance. Le recours aux « solutions sur étagères », c'est-à-dire non mises en œuvre en leur temps pour des raisons conjoncturelles de rentabilité, de faisabilité technique ou de respect des coûts, est un premier réflexe indiscutable, mais la remise en cause de l'origine de l'énergie motrice peut conduire à un véritable « re-engineering » du véhicule. Un exemple en est fourni par le concept de roue active, « Active Wheel », de Michelin (Figure 5) qui consiste à loger les freins, la suspension et le moteur électrique dans le volume des roues et qui a été présenté sur deux véhicules au salon de l'automobile de 2008. Les organes mécaniques traditionnels tels que le différentiel, l'embrayage, la boîte de vitesses sont ainsi remplacés par la mécatronique. La conception de la caisse doit être complètement remise en cause en raison de la nouvelle répartition des masses et des inerties d'une part, et des efforts d'autre part, tout en respectant les exigences de sécurité (déformation progressive en cas de choc, préservation de l'habitacle, etc.).



Figure 5. La technologie *Active Wheel* développée par Michelin intéresse aussi le domaine ferroviaire, [10].

Sans procéder à un inventaire exhaustif, on doit évoquer : le transport aérien qui n'échappe pas à une remise en question où l'on évoque le recours à la turbo-propulsion, moins gourmande en énergie, pour les courtes, voire moyennes, distances en même temps que se pose la question d'optimiser la capacité des aéronefs ; le transport maritime qui assure, de loin, la plus grosse part du transport de



fret mais dont l'évolution est gouvernée par les coûts liés à la rentabilisation des navires, les assurances ; le transport fluvial qui, dans notre pays, nécessiterait quelques grands investissements qui ressortissent au domaine du génie civil où les mécaniciens sont directement concernés.

L'attention a été récemment attirée sur le secteur de l'habitat où l'évolution des modes de vie et des exigences de confort induit des consommations énergétiques croissantes : on a ainsi vu la mise en place de normes plus sévères pour les constructions neuves, de labels obligatoires d'efficacité énergétique pour les constructions anciennes avec des programmes de rénovation ambitieux, accompagnés de mesures fiscales incitatives. Une évaluation scientifique de ces mesures propres à susciter des effets d'aubaine serait nécessaire, notamment à travers un « bilan carbone » complet.

Enfin et même si cela paraît évident, il est essentiel d'insister sur l'intérêt de développer des recherches sur le transport de l'énergie elle-même afin d'en réduire le coût énergétique.

## 4. Produire l'énergie ...

### 4.1 Le concept de Mix énergétique

La durabilité de la production de l'énergie, au sens économique du terme, implique l'adaptabilité spatiale et temporelle aux spécificités des besoins et des ressources de chaque pays. Cela signifie qu'aucun choix ne doit être fait de façon hâtive, écartant *a priori* telle ou telle ressource, ou telle ou telle solution, pour des raisons conjoncturelles. Le concept à retenir est celui de *Mix énergétique*. Celui-ci est illustré, par exemple, par l'Afrique du Sud, tel qu'exposé par le Dr. Robert CREWE [3], président de l'Académie des sciences d'Afrique du Sud, qui s'appuie sur l'énergie solaire, les biocarburants, l'énergie nucléaire, le charbon ; ou encore tel qu'exposé par le Prof. Dr. YONGXIANG LU [8], président de l'Académie des sciences de Chine : en 2050 la structure de la production d'énergie en Chine se répartirait en énergies hydraulique et nucléaire pour 20 à 25 %, énergies renouvelables autres qu'hydrauliques pour 25 à 30 %, les quelque 50 % restants étant assurés par les énergies fossiles.

La nécessité du *Mix énergétique* apparaît aussi lorsque l'on analyse la forme de la demande en énergie. En ne considérant que les besoins en électricité la demande s'établit sur plusieurs niveaux, qui correspondent à des marchés différents. La demande de base est actuellement assurée par de grosses centrales thermiques, des centrales nucléaires, des centrales hydroélectriques au fil de l'eau et, dans certains pays, des barrages hydroélectriques (elle fait l'objet de contrats à long terme). Le deuxième niveau de demande correspond aux variations par rapport à la demande de base, qui appellent la mise en réseau de capacités de production supplémentaires ; pour celles-ci, les gestionnaires de réseaux procèdent à deux types de contrats : d'une part des contrats qui correspondent à des options « call » sur la disponibilité d'une puissance convenue si elle se révèle nécessaire : cette puissance est, elle-aussi, apportée par des centrales thermiques, des barrages ; d'autre part, des contrats au jour le jour : c'est sur ce marché, dont les prix sont élevés, que les énergies renouvelables, en raison de leur intermittence, trouvent actuellement leur place. Hors de l'exemple de l'électricité, les transports, pour ne citer que ce cas, demandent majoritairement des

énergies stockables, notamment des carburants liquides à fort contenu énergétique dans l'attente de ruptures technologiques.

## 4.2 Capture et Stockage du Carbone

Pour satisfaire les besoins de la demande de base le recours aux énergies fossiles demeurera inévitable durant les prochaines décennies. La durabilité de la production considérée du point de vue environnemental impose que pour ces énergies primaires (énergie solaire stockée sous forme de charbon, de pétrole et de gaz) l'on affronte le problème des émissions de dioxyde de carbone. Le concept privilégié actuellement est celui de Capture et Stockage du Carbone<sup>3</sup>. C'est le sens de la déclaration du G8 :

*"We are aware that despite effective diversification strategies, fossil fuels will continue to be an essential component of the energy mix in many countries, at least in the medium term. The development and deployment of innovative technologies such as Carbon Capture and Storage (CCS) is therefore expected to contribute substantially to reducing emissions."*

Les variantes techniques sont multiples, qui s'appliquent à des centrales thermiques, des cimenteries ou des aciéries. La méthode la plus évidente consiste à faire réagir les gaz issus de la combustion sur du carbonate d'ammonium en solution pour former du bicarbonate d'ammonium qui est alors extrait, puis chauffé pour être transformé de nouveau en carbonate, relâchant ainsi le dioxyde de carbone qui est liquéfié, transporté et stocké, généralement dans le sous-sol. D'autres méthodes consistent par exemple à casser les molécules d'hydrocarbures avant la combustion du charbon ou à effectuer les combustions en atmosphère d'oxygène pur. Les réactions chimiques exploitées dans ces méthodes font partie d'un portefeuille bien connu, et ne posent aucune difficulté de principe. La première difficulté pratique apparaît avec le stockage lui-même. On doit en effet trouver des emplacements pour constituer des réservoirs géologiques étanches sur de très grandes échelles de temps (Figure 6).

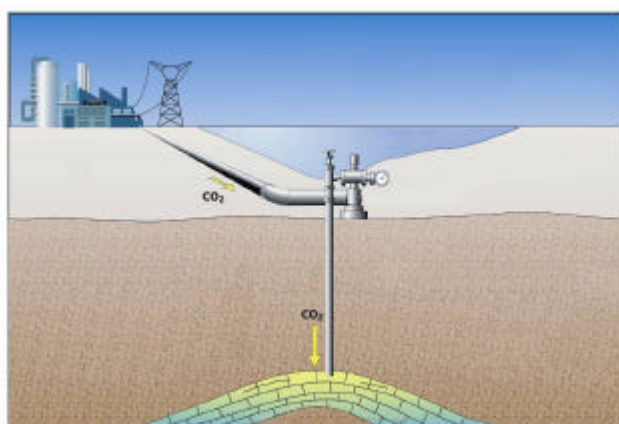


Figure 6. Présentation du "CCS" utilisée dans le sondage SOCECO2, [11].

<sup>3</sup> On dit aussi Capture du Carbone et Séquestration, Captage et Stockage du Carbone.

Les meilleurs candidats actuels sont des gisements de pétrole ou de gaz désormais abandonnés parce que épuisés (il ne faut pas sous-estimer à ce propos l'intérêt financier pour certains pays de rentabiliser ainsi ces réservoirs), ou encore des réservoirs en fin d'exploitation dont la production se trouve alors améliorée. En effet ceux-ci, pour avoir contenu du gaz sous pression pendant plusieurs millions d'années, devraient pouvoir contenir le dioxyde de carbone pour des durées semblables, sans oublier, dans certains cas, l'effet favorable des réactions chimiques de carbonatation. Celles-ci sont d'ailleurs le principe même du stockage envisagé dans des roches basiques comme les basaltes [12]. On envisage aussi des stockages dans des aquifères profonds. Les capacités de stockage évaluées par les géologues semblent couvrir des dizaines voire des centaines d'années de production de dioxyde de carbone ; cette dernière évaluation serait en harmonie avec les réserves estimées d'énergies primaires.

La mise en œuvre à l'échelle industrielle et mondiale de cette méthode de réduction des émissions de dioxyde de carbone doit être étayée par des recherches approfondies. En particulier, concernant l'utilisation des réservoirs, il est essentiel d'étudier et de modéliser le comportement à long terme du sous-sol profond soumis à ce type de sollicitation de façon à en évaluer les conséquences éventuelles sur les couches géologiques supérieures et en surface ; pour les aquifères, l'éruption naturelle du lac Nyos au Cameroun (Figure 7) le 21 août 1986, qui a libéré 1 km<sup>3</sup> de dioxyde de carbone faisant 1700 morts, a montré les dangers du processus d'ex-solution lorsque la limite de saturation du gaz carbonique dans l'eau dépassée. De la réponse scientifiquement argumentée à ces questions dépend l'acceptabilité sociale du "CCS".

La question qui se pose ensuite à propos du "CCS" est économique. Les quelques détails sur les méthodes qui ont été donnés ci-dessus mettent en évidence les composantes du coût additionnel du procédé : le coût de la capture proprement dite, en y incluant la baisse de rendement final de l'installation, le coût du transport (rentabilisation de l'investissement dans la construction de pipelines, maintenance, coût énergétique), le coût du lieu de stockage, ressource non renouvelable qui, du point de vue économique, ressortit à l'*Hotelling Type modelling*.

Actuellement il ne paraît exister qu'une petite installation de Capture et Stockage du Carbone ouverte en 2008 à Vattenfall (Allemagne). La faisabilité industrielle du concept est donc encore à prouver sur la base de réelles installations « à l'échelle 1 ». La Chine, qui construit chaque semaine une nouvelle centrale thermique dont la puissance est celle d'une tranche nucléaire (1 à 1,5 GW) sans "CCS", [7], déclare développer des technologies avancées pour le "CCS".

D'une façon générale, l'analyse faite par Geoffrey HEAL [13] conclut prudemment que, dans une vingtaine d'années, le "CCS" serait compétitif face au prix de l'émission de dioxyde de carbone : on voit ici l'importance de mesures incitatives de nature fiscales fondées sur la juste évaluation du coût social et appliquées à l'échelle globale !



Figure 7. Le lac Nyon, [13].

### 4.3 L'énergie nucléaire

Pour des raisons de compromis politique et d'acceptabilité sociale dans certains pays, les déclarations du G8 demeurent prudentes sur l'énergie nucléaire, mais en admettent implicitement la nécessité actuelle, reconnue par un nombre croissant de pays :

*"We witness that a growing number of countries have expressed interest in nuclear power programmes as a means to address climate change and energy security concerns. In the opinion of these countries, nuclear energy can play an essential role, as it meets the dual challenge of reducing greenhouse gas emissions and lowering fossil-fuel consumption. We reaffirm that the fundamental prerequisite for the peaceful use of nuclear energy is the international commitment to safeguards/non proliferation, safety and security (3S)."*

De fait, on évalue à 180 le nombre de centrales nucléaires susceptibles d'être construites durant la prochaine décennie dans le monde, en comparaison des 39 construites de 1999 à ce jour<sup>4</sup>. En l'état actuel l'énergie nucléaire ne peut être considérée comme une énergie renouvelable. Son caractère durable au sens classique du terme n'est pas assuré car dépendant de l'approvisionnement en combustible ; il ne l'est pas non plus au sens environnemental en raison du problème non résolu de la gestion de ce qu'il est convenu d'appeler les « déchets nucléaires ». La technologie des réacteurs à neutrons rapides, réacteurs dits de la quatrième génération, qui est présentée comme devant contribuer à la résolution de ces problèmes, ne sera vraisemblablement pas disponible industriellement avant quelques décennies car elle requiert un important effort international de recherche scientifique et technique dans le domaine de la métallurgie au sens large pour déboucher sur la mise au point des matériaux nécessaires, actuellement indisponibles. La conférence d'André PINEAU dans ce congrès traitera de cette question avec beaucoup plus de compétences que je ne

---

<sup>4</sup> TIME, August 17, 2009.

saurais le faire. Insistons sur cette évidence rappelée par le président OBAMA [2] citant Vannevar Bush, conseiller scientifique du président ROOSEVELT: "*Basic scientific research is scientific capital.*" L'expérience acquise sur les technologies actuellement mises en œuvre, conduit aux États-Unis à permettre de prolonger la licence d'exploitation des centrales en service, initialement accordée pour 40 ans, jusqu'à 60 ans tandis qu'en France on envisage de prolonger la durée de vie initialement prévue de 30 ans jusqu'à 40 ans, voire plus. Cette décision, scientifiquement fondée sur les analyses de tenue des matériaux, permettrait tout à la fois d'étaler le renouvellement du parc nucléaire, avec les investissements capitalistiques que cette entreprise nécessite, au moment où le coût des réacteurs EPR s'est révélé beaucoup plus important que prévu, de temporiser dans la recherche de nouveaux sites et de progresser dans les techniques de démantèlement. En ce qui concerne la fusion, l'horizon des prochaines décennies ne permet pas de l'envisager comme une perspective réaliste de production d'énergie au niveau industriel.

Pour ces prochaines décennies, l'énergie nucléaire appelle des investissements dans le domaine de la recherche qui se situent au plan de la physique macroscopique, de la mécanique, de la métallurgie. En outre, il demeure indispensable de mener des recherches actives sur le stockage des « déchets » qui constitue un point crucial dans l'acceptabilité sociale. Même si la nature des problèmes posés et les contraintes correspondantes sont différentes, les recherches nécessaires sur la tenue à long terme du sous-sol rejoignent fondamentalement celles à faire pour le "CCS".

L'ensemble de ces considérations est en bon accord avec la politique actuelle de la Chine [8], dite d'énergie nucléaire avancée.

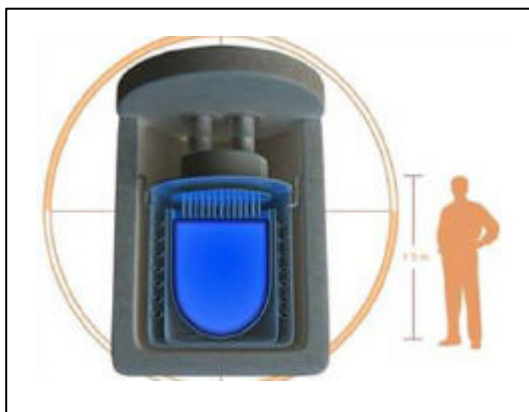


Figure 8. « Mini-réacteur nucléaire » pour les véhicules, les régions éloignées ou les satellites , [8].

## 4.4 Les énergies renouvelables

### 4.4.1 La géothermie

Les sources d'énergie géothermique les plus abondantes se rencontrent dans les régions de tectonique intense, dont l'Islande est l'exemple le plus connu où la géothermie est particulièrement bien exploitée, mais parmi lesquelles il ne faut pas oublier les Antilles ou La Réunion. Le développement de la géothermie peut aussi être envisagé hors de ces zones en recherchant des

roches ignées chaudes à grande profondeur dans des fossés tectoniques. Cette perspective appelle d'importants travaux de recherche : exploration géologique, étude mécanique et hydrologique des roches, modélisation afin d'évaluer les incidences du procédé sur les aquifères situés dans les couches supérieures et sur les terrains superficiels [14].

#### **4.4.2 La biomasse**

Par la photosynthèse l'énergie solaire se trouve stockée dans la biomasse obtenue à partir du dioxyde de carbone et de l'eau. La biomasse est ainsi une ressource énergétique renouvelable puisqu'elle procède à la capture du dioxyde de carbone, lequel est ensuite libéré lors de son utilisation. Cette énergie renouvelable est la plus anciennement exploitée par l'homme, sous forme de combustible de chauffe. Les applications actuelles concernent la production de carburants de substitution destinés essentiellement aux transports et aux engins : le choix s'est porté sur le bioéthanol et sur le biodiesel. Quel que soit le caractère attrayant de l'entreprise, il convient d'en faire le bilan réel en considérant les points de vue écologique et humain et en tenant compte des spécificités géographiques. Parmi les risques majeurs :

- du point de vue écologique, la culture intensive de biomasse destinée à la production de biocarburants peut porter atteinte à la biodiversité, par exemple en conduisant à des déforestations ;
- du point de vue humain, c'est la compétition entre la culture de cette biomasse et la production de produits alimentaires qui est en cause en même temps que l'utilisation des ressources en eau. On peut même redouter de voir apparaître, à cette occasion, une nouvelle forme de colonialisme. On rappelle qu'au Mexique, le prix de la tortilla a subi une augmentation considérable en 2007 en raison du détournement de la production de maïs aux États-Unis vers la production d'éthanol alors qu'auparavant, depuis la mise en place de l'ALENA, les États-Unis étaient exportateurs de maïs vers le Mexique.

HEAL [13], citant HAHN & CECOT [15], note que l'expérience américaine en matière de biocarburants a été jusqu'à ce jour malheureuse, l'éthanol produit à partir du maïs étant plus une excuse pour des subventions agricoles qu'une source d'énergie<sup>5</sup>. En fait, comme cela apparaît sur la Figure 9, la meilleure production d'éthanol est obtenue à partir de la canne à sucre tandis que pour le biodiesel on doit se tourner vers l'huile de palme [16].

L'expérience brésilienne est concluante dans le domaine du bioéthanol produit à partir de la canne à sucre, qui couvre pour moitié les besoins en essence. Les zones de production, sont représentées sur la Figure 10 et n'engendrent ni déforestation de l'Amazonie, ni pénurie alimentaire ; la surface consacrée à cette production est inférieure à 1% des terres cultivables. De même, la Chine, l'Inde et l'Afrique du Sud dans sa stratégie industrielle de biocarburants (5 décembre 2007), ont fait le choix de la canne à sucre et de la betterave pour l'éthanol excluant le maïs pour éviter toute compétition avec les ressources alimentaires.

---

<sup>5</sup> "Corn-based ethanol has been seen more as an excuse for agricultural subsidies than as a power source".

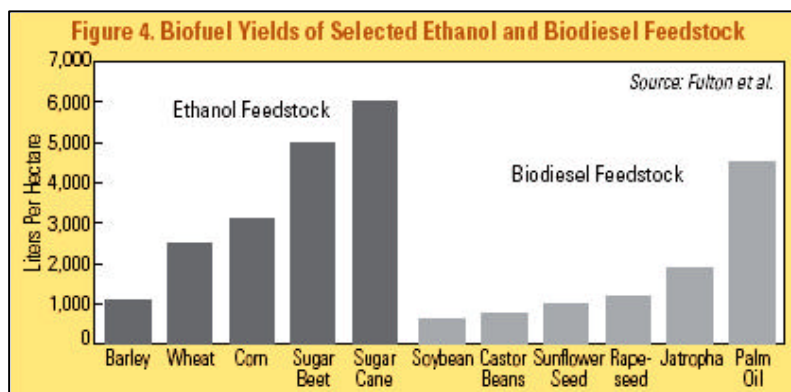


Figure 9. Rendement de diverses cultures pour la production de biocarburants. World Watch 2006, [http://www.worldwatch.org/system/files/EBF008\\_1.pdf](http://www.worldwatch.org/system/files/EBF008_1.pdf) 20090227, bioenergy-in-brazil-20090227.pptx; © C.H. BRITO CRUZ e Fapesp

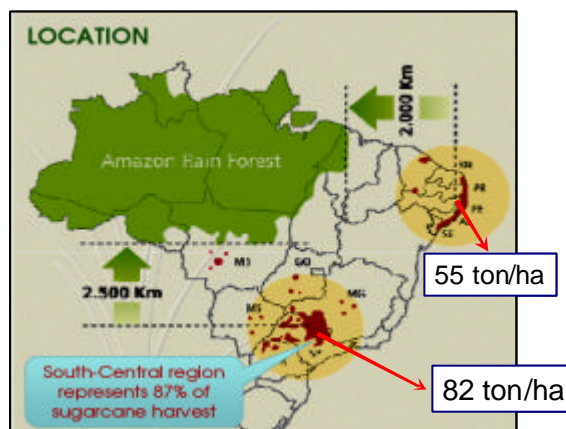


Figure 10. Zones de production de la canne à sucre pour le bioéthanol au Brésil. 20090227, bioenergy-in-brazil-20090227.pptx; © C.H. BRITO CRUZ e Fapesp

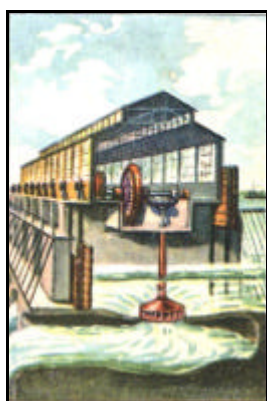
De nouvelles pistes pour la production de biocarburants sont actuellement explorées comme dans le programme “Along with petroleum” de l’ENI où des micro-algues et des microorganismes sont utilisés pour produire des précurseurs de biocarburants à partir de déchets de biomasse [17].

#### 4.4.3 L’énergie hydraulique

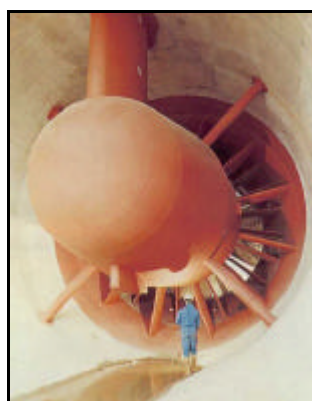
L’énergie hydraulique est sans doute la plus familière et encore la moins controversée des énergies renouvelables. Faisant suite aux moulins à eau, les centrales au fil de l’eau produisent de l’énergie électrique qui est habituellement utilisée pour répondre à la demande de base. Mais ce sont les barrages qui, sans conteste, apportent la majeure contribution à ce type d’énergie renouvelable. Il est généralement admis qu’un tiers des sites potentiels sont actuellement équipés de barrages et de centrales électriques, les deux tiers restants étant situés en Amérique du Sud et en Afrique centrale, souvent loin de la demande, et en Asie dans des régions très peuplées. Les très grands équipements récents tels que le barrage binational d’Itaipu (Brésil – Paraguay) dont la puissance est de 14 000 MW et le barrage des Trois-Gorges en Chine d’une puissance de 18 200 MW, posent la question des

dommages écologiques collatéraux. D'un point de vue général, la sécurité des barrages, notamment vis-à-vis de l'aléa sismique, demeure un sujet de recherche, en particulier pour les équipements anciens pour lesquels on ne dispose pas toujours de toutes les données relatives à la construction et qui sont donc justiciables de méthodes d'analyse inverse.

Deux autres aspects de l'énergie hydraulique sont également évoqués dans le portefeuille des énergies renouvelables : l'utilisation de l'énergie des marées et l'utilisation de l'énergie des vagues. L'usine marémotrice de la Rance, inaugurée en 1966 sur un site où le marnage est particulièrement important, faisait suite à un premier projet engagé en 1925 et abandonné en 1930 faute de financement. Forme moderne des moulins à marée, elle est équipée de groupes bulbes à double effet, qui peuvent fonctionner en turbinage ou en pompage, pour une puissance installée de 240 MW avec un facteur de disponibilité de l'ordre de 25% (Figure 11). Les conséquences de l'implantation de cette usine sur l'écosystème de la Rance, les fonds marins, les marnages et les courants de l'estuaire, l'ensablement, sont importantes.



a)



b)

Figure 11.a) « Turbines d'une usine actionnée par la marée », *Les Merveilles du monde*, 1932.

b) Une des 24 turbines réversibles (groupe bulbe) de l'usine marémotrice de la Rance. Médiathèque Edf.

L'utilisation de l'énergie des vagues et de l'énergie des courants marins suscite l'intérêt à travers des projets ou des réalisations tels que *Pelamis* (Figure 12) ou *Searev*, et les hydroliennes (*SeaGen*, Figure 13) qui tirent profit des efforts techniques faits dans le domaine de l'éolien. La technologie correspondante est encore au stade du démonstrateur : la puissance des hydroliennes est actuellement de l'ordre de quelques centaines de kW. Leur impact écologique, notamment pour ceux qui concerneraient les courants marins profonds, demeure à évaluer.





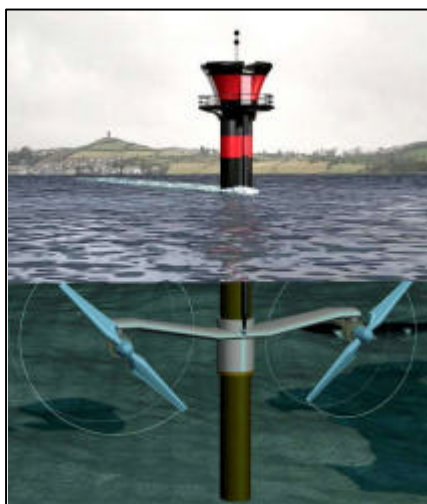
a)



b)

Figure 12. a) « Projet d'usine utilisant la force des vagues », *Les Merveilles du monde*, 1932.

b) *Pelamis Wave Farm* à Aguçadoura (Portugal)



a)



b)

Figure 13. a) Hydrolienne *SeaGen*. b) Les rotors du *SeaGen* dans les chantiers Harland and Wolff à Belfast.

#### 4.4.4 L'énergie éolienne

Comme l'énergie hydraulique prend la suite des moulins à eau et des moulins à marée, l'énergie éolienne s'inspire des moulins à vent et des pompes éoliennes d'autrefois pour extraire et transformer une partie de l'énergie cinétique du courant fluide qui traverse le rotor de l'engin utilisé. On sait que la puissance cinétique d'un jet fluide de section droite  $S$  et de vitesse  $U$ , est proportionnelle à  $S$  et au cube de la vitesse  $U$ <sup>6</sup>. Le calcul de la puissance de sortie d'une éolienne n'est pas aussi simple : la vitesse de rotation de l'hélice est maintenue entre 12 et 15 tours / minute grâce à un calculateur embarqué dans la nacelle qui règle l'orientation de l'hélice et l'orientation des pales suivant le vent ; la puissance de l'hélice est égale au produit de cette vitesse de rotation par le couple exercé par le vent sur les pales ; la puissance de sortie de l'éolienne dépend ensuite du rendement du multiplicateur de vitesse et de l'alternateur. De fait, il apparaît que la puissance d'une éolienne croît avec la surface

<sup>6</sup> Et proportionnelle à la masse volumique du fluide.

balayée par les pales, ce qui conduit à la construction de grandes éoliennes lorsque les contraintes locales le permettent. Les problèmes mécaniques posés par cet accroissement des dimensions concernent le matériau constitutif des pales dans le but de limiter l'accroissement corrélatif du poids et de l'inertie de rotation, leur conception de façon à optimiser le rendement aux divers régimes de vent, leur dimensionnement pour résister aux sollicitations de service, aux sollicitations exceptionnelles et à la fatigue provoquée par les échappements tourbillonnaires ; se posent aussi des problèmes de génie civil quant à l'ancrage et à la stabilité de ces machines. De nombreux modèles d'éoliennes sont disponibles sur le marché, qui permettent d'effectuer le choix de l'équipement en fonction des caractéristiques des vents, de la rugosité du terrain, etc. La puissance nominale peut atteindre 6 MW (puissance disponible pour une vitesse du vent au moins égale à 15 m/s), la hauteur de tour 160 m et le diamètre du rotor 126 m (Figure 14).



a)



b)

Figure 14. a) Éolienne Bollée de relevage d'eau sur son château d'eau (XIXe siècle). <http://fr.wikipedia.org/wiki/>.  
b) Pale d'éolienne.

L'énergie éolienne est l'énergie renouvelable la plus exploitée actuellement et la plus compétitive du point de vue économique si l'on dispose de sites avec des vents forts et réguliers dans des zones proches des centres d'utilisation de l'énergie. Le handicap, qu'elle partage d'ailleurs avec d'autres ressources d'énergies renouvelables, est son intermittence qui, en l'état actuel, interdit son utilisation pour satisfaire la demande de base ou oblige, pour ce faire, à disposer d'autres capacités de production supplémentaires pour prendre le relais le cas échéant (énergie hydraulique, par exemple). On estime couramment que le facteur de disponibilité est de 25 %, dû soit à l'insuffisance de vent soit à des vents trop violents qui obligent à mettre les pales en drapeau<sup>7</sup>. Une première conséquence de cette intermittence est que, si la part d'énergie injectée par la production éolienne devient importante, la stabilité du réseau de distribution peut être compromise et il est nécessaire de développer ce qu'il est convenu d'appeler désormais des « réseaux intelligents »<sup>8</sup>. Une autre conséquence, comme indiqué au paragraphe 4.1, est que la production d'énergie éolienne ne peut être utilisée pour

<sup>7</sup> On annonce une nouvelle génération d'éoliennes capables d'accepter des vents de 150 km/h, indépendamment des petites éoliennes utilisées dans les régions tropicales que l'on peut rabattre lorsqu'un cyclone est annoncé.

<sup>8</sup> *Smart grids*.

satisfaire la demande de base, ni les contrats de « call ». En fait, comme pour l'énergie photovoltaïque qui sera évoquée dans la suite, un défi majeur est celui du stockage de l'énergie. Anticipant sur un paragraphe ultérieur, il est intéressant de rappeler l'exemple historique de Charles F. Brush en 1888 qui avait construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité avec un stockage par batterie d'accumulateurs.

La localisation des « fermes d'éoliennes » ou des « parcs éoliens » est évidemment gouvernée par la recherche de l'élément essentiel, le vent. Des contraintes supplémentaires sont d'ordre écologique (impact sur les oiseaux, les chauves-souris, pollution sonore, ...) et économique (raccordement au réseau). On assiste au développement de parcs éoliens offshore, dont l'installation est évidemment beaucoup plus coûteuse que sur la terre ferme<sup>9</sup> en raison des contraintes particulières dues aux problèmes de génie civil, de génie mécanique et de génie des matériaux (fondations, ancrages, résistance de la structure à la fatigue et à la corrosion), et de génie électrique pour le raccordement au réseau. En revanche, c'est dans ces « parcs éoliens » que l'implantation des éoliennes de grande puissance se révèle optimale en raison des vents puissants et réguliers qui sont disponibles (Figure 15).



Figure 15. Éolienne en pleine mer en Belgique. <http://fr.wikipedia.org/wiki/>.

Mise à part l'épineuse question de l'intermittence, on doit s'interroger sur l'importance de la ressource en énergie éolienne elle-même. À titre d'exemple, pour les États-Unis, HEAL [13] indique que les sites les plus favorables à l'énergie éolienne se trouvent au centre du pays et fait état de l'opinion généralement répandue selon laquelle l'énergie des vents des Grandes Plaines (Texas, Kansas, Dakota du Nord) et des sites offshore suffirait à assurer tous les besoins des États-Unis<sup>10</sup>. L'Allemagne dispose déjà d'un parc éolien de 18 GW et a un programme de développement de 20 GW supplémentaires conditionné par la résolution du problème crucial d'intermittence et, d'une façon

<sup>9</sup> Geoffrey HEAL [13] donne les ordres de grandeur suivants concernant les investissements nécessaires : 4000 USD par kW pour un parc offshore et 2000 USD pour un parc sur la terre ferme ; à comparer à 1700 à 1900, voire 2500 USD par kW pour une centrale thermique à charbon sans "CCS".

<sup>10</sup> "Though I have not found a peer-reviewed source for this and do have one for the opposite statement".

plus générale, par la conception de réseaux robustes et intelligents comme l'a montré la panne de courant européenne de novembre 2006<sup>11</sup>.

#### 4.4.5 Énergie solaire

L'utilisation de l'énergie solaire se présente essentiellement sous deux formes : l'utilisation du rayonnement solaire pour la production d'électricité photovoltaïque d'une part, et pour la production d'énergie thermique d'autre part.

Le « solaire photovoltaïque » est actuellement le plus populaire médiatiquement et l'on voit des panneaux solaire photovoltaïques sur les toits ou les façades de bâtiments publics ou commerciaux, ou des logements individuels, voisinant parfois avec des installations de chauffage solaire de l'eau sanitaire, dans toutes les parties du monde. La puissance de crête d'un panneau photovoltaïque (puissance dans les conditions d'ensoleillement maximal) est de 1 kWc pour une surface de 8 à 10 m<sup>2</sup>. Pour visualiser cet ordre grandeur, on peut mentionner l'exemple de la « Tour solaire » à Manchester : la façade de la *CIS Tower* (Figure 16), construite en 1962, fut réhabilitée de 2004 à 2006 dans un projet de 5,5 millions de Livres sterling et revêtue de 7 224 panneaux photovoltaïques ; la puissance moyenne sur l'année est de 21 kW, injectant annuellement dans le réseau 180 000 kWh.



Figure 16. La Tour solaire de Manchester : *CIS Tower*.

Le coût du « solaire photovoltaïque » tel qu'estimé par HEAL [13] s'élève à 7 000 USD par kW ce qui ne le rend pas particulièrement compétitif, même par rapport à d'autres énergies renouvelables en ce

---

<sup>11</sup> Contrairement à une idée parfois émise, la panne de courant européenne du 4 novembre 2006 n'a pas été provoquée par une carence de la production d'électricité d'origine éolienne mais par la mise hors-service programmée et, semble-t-il, avancée de deux lignes de transport de 380 kV reliant Conneforde à Diele. En revanche, l'analyse a posteriori du processus de retour à la normale montre que les logiciels de gestion des déconnexions et reconnexions des centrales éoliennes en fonction de la fréquence du réseau ont eu un comportement chaotique. Pour fixer les idées, on notera qu'au moment de l'incident la puissance dans le réseau européen était de 274 100 MW dont 15 000 MW éoliens (produits essentiellement en Europe du Nord et en Espagne).

qui concerne la production d'électricité à injecter dans le réseau, sauf mesures incitatives sur le prix de rachat obligé de cette électricité. En revanche, ce type d'installation est à considérer pour des applications locales où l'énergie est essentiellement utilisée sur place et durant les périodes de disponibilité, allégeant d'autant la charge du réseau s'il existe ; c'est le cas des toits solaires installés sur les bâtiments de centres commerciaux ou de sites industriels par exemple (Figure 17).



Figure 17. SunEdison : toit solaire d'Alvarado, USA ; puissance : 1,3 MWc.

L'importance des mesures incitatives est évidente dans le cas de l'Allemagne qui a engagé une politique volontariste qui la place dans les premiers dans la compétition industrielle. La recherche dans le domaine du « solaire photovoltaïque » est actuellement très active. Elle porte notamment sur la production de couches minces photovoltaïques, flexibles et utilisant d'autres matériaux que le silicium – matériaux organiques et polymériques nanostucturés –, qui apparaissent comme le prochain saut technologique.



Figure 18. Projet de l'ENI pour la production de cellules solaires organiques et polymériques, [17].

Le « solaire thermique » sous la forme d'énergie solaire concentrée (*CSP, Concentrated Solar Power*) apparaît comme disposant d'un meilleur potentiel pour des applications à grande échelle. Le principe est de concentrer le rayonnement solaire au moyen de miroirs sur une installation de production de vapeur afin, à travers une turbine, d'entraîner un alternateur (Figure 19). Des projets ont récemment

été présentés qui imaginent la construction de gigantesques installations de ce type au Sahara, l'électricité étant ensuite vendue et acheminée au même titre qu'actuellement les vecteurs d'énergie que sont le pétrole et le gaz. Il est clair que des problèmes techniques passionnants se poseraient pour la réalisation pratique d'un tel projet, ne serait-ce qu'en raison de l'environnement et des importantes variations de température.



Figure 19. Miroirs concentrateurs solaires à Sandia (Nouveau Mexique, USA).

## 5. Stocker l'énergie ...

### 5.1 Les stockages naturels

Les énergies fossiles représentent une forme naturelle de stockage de l'énergie d'origine biochimique qui s'est mise en place à l'échelle des temps géologiques. Le fort contenu énergétique de ces matériaux, d'abord le charbon, puis le pétrole et le gaz a permis le développement industriel et le développement des moyens de transport actuels. De plus, le pétrole et le gaz étant des fluides, sont des vecteurs d'énergie commodes qui se transfèrent dans des réseaux de conduites.

À l'échelle de temps humaine, la photosynthèse représente, elle-aussi, un stockage de l'énergie solaire sous la forme de biomasse. La combustion du bois était le moyen traditionnel d'exploiter cette énergie, maintenant relayé par la production et l'utilisation des biocarburants, fluides, dont le contenu énergétique est évidemment bien supérieur. À cette même échelle de temps, une forme naturelle de stockage de l'énergie est fournie par les nuages sous la forme de l'énergie potentielle de la vapeur d'eau dans le champ de pesanteur ; c'est cette énergie stockée, accumulée dans les glaciers en altitude et dans l'eau des barrages, qui est exploitée par les usines hydroélectriques et les installations au fil de l'eau.

Les besoins de stockage que posent la majorité des énergies renouvelables sont dus à leur intermittence et se placent plus ou moins à l'échelle de temps du quotidien. On n'évoquera dans la suite, sauf pour l'anecdote, que les solutions d'ampleur industrielle.

## 5.2 Le stockage hydraulique

Semblable au stockage « météorologique », la mise en œuvre du stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle de gravité d'une masse d'eau est une pratique courante dans les usines marémotrices et dans les centrales hydroélectriques associées à des barrages : lorsque l'énergie est excédentaire et donc peu chère on pompe de l'eau de l'aval vers l'amont pour augmenter la hauteur de retenue dans le bassin de l'usine ou dans le barrage. L'application de cette méthode aux autres sources renouvelables de production d'électricité (éoliennes, photovoltaïques) suppose l'association à un réseau intelligent et la disponibilité des capacités de stockage hydraulique correspondantes, dont une variante a été imaginée sous la forme d'atoll artificiel de stockage (Figure 20).

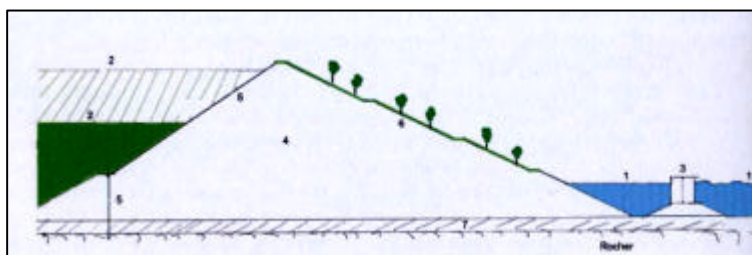


Figure 20. Coupe d'un atoll de stockage d'énergie selon [18].

## 5.3 Autres stockages de l'énergie électrique

Le « solaire thermique » sous la forme d'énergie solaire concentrée souffre évidemment de l'intermittence due au manque d'ensoleillement durant la nuit. Afin de pallier cette carence il est envisagé de stocker l'énergie au moyen d'une transformation de phase : emmagasiner l'énergie en faisant fondre une masse de sel (chlorure de sodium), la chaleur latente pouvant ensuite être récupérée durant sept heures à travers des échangeurs pour actionner la turbine et l'alternateur. Une usine CSP est ainsi en projet près de Sacramento (Californie, USA) [13].

Mise à part cette solution spécifique, adaptée à ce type particulier de production d'énergie, le problème général de stockage pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables est celui du stockage de l'électricité. La solution la plus apparente est le stockage sous forme d'énergie chimique dans des batteries rechargeables, comme Charles F. Brush en 1888. Fort heureusement, en 130 ans des progrès considérables ont été accomplis dans ce domaine où, après les batteries au plomb, les couples Ni-Mn et Ni-Cd, le choix est actuellement fixé sur les batteries Li-ion tandis que la recherche continue pour en améliorer les performances. Le stockage dans des super-condensateurs (Figure 21) est aussi une solution ; elle est notamment utilisée dans les engins de traction diesel des trains pour répondre aux appels de courant extrêmement forts du démarrage ; ces éléments ont une grande capacité, une cyclabilité élevée qui les rend particulièrement adaptés à la gestion des pics [9].



Figure 21. Supercondensateur, [9].

L'histoire des éoliennes rapporte aussi que la première éolienne génératrice d'électricité que l'on peut qualifier d'industrielle fut l'œuvre du Danois Poul La Cour pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. De fait, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau peut être utilisée pour stocker l'énergie des ressources intermittentes. Des programmes de recherche sont en cours dans ce domaine, tels que celui de l'ENI qui vise au développement de photoélectrodes constituées de matériaux nanostructurés, à l'assemblage et à la caractérisation de cellules photo-électrochimiques, à l'évaluation de leur stabilité et des facteurs d'échelle [17]. Il semble toutefois que l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique pose encore des problèmes de tenue des matériaux difficiles à résoudre.

## 6. Quels engagements ?

La perspective décrite ci-dessus des défis énergétiques pour les prochaines décennies appelle évidemment la question des moyens nécessaires à la prise de décisions pertinentes et à leur mise en œuvre. Il apparaît d'abord que, tout en respectant les spécificités locales, tant en ce qui concerne les ressources que les besoins, l'engagement doit se situer au niveau international. Sans qu'il soit nécessaire d'invoquer l'éthique ou la vertu, la simple réalité économique impose ce niveau de coopération pour l'harmonie et la régularité des échanges et en raison de l'importance des tâches en jeu et de leur coût. Il s'agit d'un engagement international pour la recherche, d'un engagement international pour l'évaluation indépendante des décisions possibles, d'un engagement international pour la construction de démonstrateurs, de prototypes et d'installations pilotes, et d'un engagement international pour la formation de compétences [19].

### ***La recherche***

- Il est nécessaire de poursuivre l'amélioration des modèles et des simulations climatiques, à partir de l'approfondissement de la connaissance de tous les phénomènes physiques, chimiques, biologiques complexes qui entrent en jeu dans l'absorption du dioxyde de carbone par la biosphère afin de mieux évaluer l'impact réel des mesures que l'on sera amené à proposer.
- L'utilisation des énergies fossiles se poursuivra dans les prochaines décennies. Il est nécessaire de développer la recherche fondamentale concernant le comportement à très long terme du sous-sol dans les conditions de stockage du dioxyde de carbone et aussi concernant le comportement des aquifères profonds dans lesquels on envisage le stockage du gaz carbonique.



- Pour l'énergie nucléaire de demain, la recherche fondamentale s'impose dans le domaine de la métallurgie au sens large pour déboucher sur la mise au point des matériaux nécessaires, actuellement indisponibles. Dans l'attente de la solution potentielle au problème de la gestion des déchets nucléaires apportée par les réacteurs de quatrième génération, les études fondamentales concernant l'entreposage en sous-sol doivent être menées avec diligence dans le but d'améliorer et de valider les modèles et les simulations.
- Les biotechnologies sont d'ores et déjà un important sujet de recherche, notamment pour la transformation de la biomasse, mais qui, selon des études actuellement menées en Inde, semblerait pouvoir aussi conduire à une transformation directe du dioxyde de carbone.
- Le Mix énergétique où interviennent les énergies renouvelables intermittentes modifie profondément les réactions des réseaux et requiert une analyse urgente du concept de réseau intelligent.

### ***L'évaluation***

C'est sur la base des résultats de la recherche que pourra être mis en œuvre l'engagement international d'évaluation. En effet, compte tenu de l'ampleur des décisions qui devront être prises tant du point de vue de leur coût que de celui de leur impact économique, social et environnemental global, des arbitrages seront nécessaires au niveau international. Il est essentiel, pour l'éthique et pour l'acceptabilité sociale, que ces décisions soient prises indépendamment des pressions de tous ordres, économiques, politiques, voire sur la base de simples croyances ou dogmes. Cette évaluation internationale indépendante, fondée sur des faits scientifiquement avérés, devra notamment écarter les solutions irréalistes afin non seulement d'éviter des échecs coûteux qui, outre le temps perdu, conduiraient au découragement. Elle devra s'assurer de la faisabilité, de la durabilité et de la sûreté des solutions proposées.

### ***La construction de prototypes***

La vérification de la faisabilité et de la viabilité d'une solution industrielle passe par la construction d'installations pilotes, de démonstrateurs, de prototypes. L'engagement international dans cette construction permet évidemment d'en répartir les coûts mais apporte aussi la confiance et le partage de la connaissance.

### ***La formation de compétences***

L'effort à fournir est global et nécessite que des compétences soient présentes dans tous les pays. Dans les pays développés on assiste à une prise de conscience récente de ce besoin, qui conduit à développer et à favoriser des formations tant au niveau supérieur qu'au niveau des techniciens. Le besoin est crucial dans les pays en développement. La Figure 20 communiquée par le Dr. Robert CREWE [3] montre l'état des besoins sur 5 ans pour l'Afrique comparés aux flux de formation disponibles ; on remarque d'ailleurs, sans surprise, que le déficit le plus fort concerne les techniciens. L'engagement international dans ce domaine est non seulement une nécessité mais une chance !

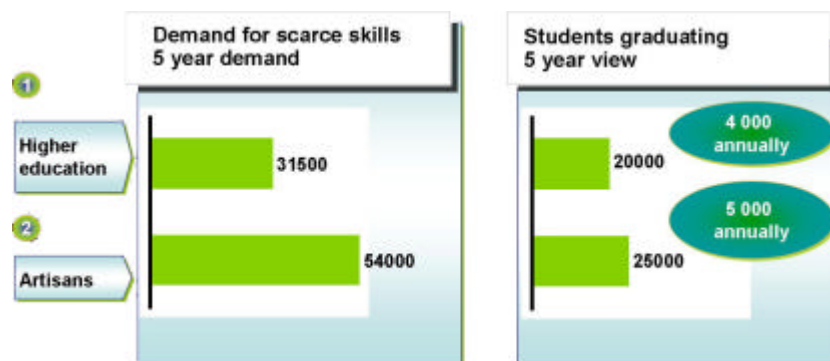


Figure 22. Les besoins de formation dans le domaine de l'énergie en Afrique d'après [8].

## Références

[1] BARACK OBAMA'S inaugural address. [http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/obama\\_inauguration/7840646.stm](http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/obama_inauguration/7840646.stm).

[2] Remarks by the President at the National Academy of Sciences annual meeting. [http://www.whitehouse.gov/the\\_press\\_office/Remarks-by-the-President-at-the-National-Academy-of-Sciences-Annual-Meeting/](http://www.whitehouse.gov/the_press_office/Remarks-by-the-President-at-the-National-Academy-of-Sciences-Annual-Meeting/).

[3] CREWE, R. (2009). *Energy in Africa: Prospects and Challenges*. G8+5 Academy Meeting, Rome, March 26-27, 2009.

[4] KING HUBBERT, M. (1956). Nuclear Energy and the Fossil Fuels. *Drilling and Production Practice, American Petroleum Institute*, 1956.

[5] [http://www.globalwarmingart.com/wiki/image:Recent\\_Sea\\_Level\\_Rise.png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/image:Recent_Sea_Level_Rise.png)

[6] *Global Climate Change Impacts in the United States*. <http://www.globalchange.gov/publications/reports/scientific-assessments/us-impacts>

[7] GÉRONDEAU, Ch. (2009). *CO<sub>2</sub> Un mythe planétaire*. Les éditions du Toucan.

[8] YONGXIANG LU (2009). *New Challenges, New Opportunities and New Strategy. Energy Technology Innovation Strategy of CAS*. G8+5 Academy Meeting, Rome, March 26-27, 2009.

[9] Freiner puis...récupérer. – Les supercondensateurs en puissance de démarrage. – 5 à 15 % d'économies d'énergie. – Phénomènes aérodynamiques à grande vitesse. *Rail et Recherche*, **50**, janvier/février/mars 2009, 12-13 ; 15-16 ; 17-18 ; 24-25.

[10] Active Wheel ; un concentré d'énergie dans les roues. *Rail et Recherche*, **52**, juillet/août/septembre 2009.

[11] HA-DUONG, Minh, (2007). L'acceptabilité sociale du captage et du stockage du CO<sub>2</sub>. *Séminaire sur la chaîne énergétique du carbone*, Espace Hamelin, Paris, 28 juin 2007.

[12] [http://www.metstor.fr/thematiques/roches\\_basiques.htm](http://www.metstor.fr/thematiques/roches_basiques.htm)

[13] HEAL, G. (2009). *The Economics of Renewable Energy*. Paper presented at the Mellon-Sawyer Final Workshop , Nuffield College , Oxford , June 30 and July 1 , 2009.

[14] TISSOT B. (2007) *Énergie 2007-2050. Les choix et les pièges*. Académie des sciences – DNBR. Tome X – 2007.

[15] HAHN, Robert W. & CECOT, Caroline, (2008) The Benefits and Costs of Ethanol: An Evaluation of the Government's Analysis (August 1, 2008). AEI-Brookings Joint Center Working Paper No. 07-17; *Journal of Regulatory Economics*, Forthcoming. Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=1027692>.

[16] PALLIS, Jacob, (2009). *Bioenergy in Brazil*. G8+5 Academy Meeting, Rome, March 26-27, 2009.

[17] CARRA, Sergio, (2009). *Making sense of Chemistry in view of the incoming energy scenario*. G8+5 Academy Meeting, Rome, March 26-27, 2009.

[18] BATAILLE, C. & BIRRAUX, C., (2009). *Évaluation de la Stratégie nationale de recherche énergétique*. Rapport OPECST, février 2009.

[19] JARRY, B., LAVAL, G., RUELLE, G. & SALENÇON, J. (2009). *Realistic Commitments in the Energy Field up to 2050*. (Académie des sciences & Académie des technologies), G8+5 Academy Meeting, Rome, March 26-27, 2009.