

Energie ET Sécurité

UNE PUBLICATION DE L'IEER

No. 11 2000

Eolien contre Plutonium : une étude comparative

PAR ARJUN MAKHIJANI

Basé sur le rapport 1999 de l'IEER par Marc Fioravanti, *Wind Power Versus Plutonium*¹

En théorie, aussi bien l'éolien que le plutonium pourraient fournir une source d'énergie à long terme pour l'humanité. L'utilisation du plutonium a des conséquences néfastes évidentes, aussi bien pour la prolifération que pour l'environnement, qui ont été décrites dans de nombreuses publications de l'IEER.² Le seul facteur qui plaide donc en faveur du plutonium paraît être son intérêt économique à long terme. Afin d'étudier ce facteur en détail, l'IEER a mené une étude comparative du plutonium et de l'éolien en tant que sources d'énergie, qui intégrait une étude de cas sur le Japon. Nous avons choisi le Japon pour les deux caractéristiques suivantes : une capacité relativement faible pour l'éolien basé à terre, et une forte densité de population. Si nous mettons de côté la question des conséquences des accidents, les besoins de l'éolien en matière d'occupation des sols sont largement plus importants que ceux de l'économie du plutonium. Par conséquent, si la comparaison économique se révélait être favorable à l'éolien, la conclusion pourrait être généralisée relativement facilement à de nombreux autres pays et régions du monde.

Pour ses comparaisons, l'IEER a fait le choix de la technologie de l'énergie éolienne offshore, parce que le placement de turbines en offshore répond à la plupart des problèmes écologiques évoqués à l'encontre de l'énergie éolienne. Plus précisément, ce choix pourrait être fait dans les pays et régions sujets à une limitation de disponibilité des sols, tels que le Japon. Des centrales d'énergie éolienne offshore, lancées en 1991, sont exploitées avec succès au Danemark, en Allemagne et en Suède.

Au cours des cinquante dernières années, d'énormes budgets ont été consacrés à travers le monde dans le but de développer le plutonium comme source d'énergie, alors que les efforts fournis pour développer l'éolien ont, quant à eux, été bien légers. Des dizaines de milliards de dollars ont été dépensés pour le seul développement des réacteurs surgénérateurs. Ces réacteurs ont pour objectif de convertir de l'uranium 238 non fissile, qui est assez abondant dans la nature mais n'est pas

LIRE LA SUITE PAGE 6
VOIR LA PAGE 9 POUR LES ANNOTATIONS



VESTAS WIND SYSTEMS

Turbine éolienne à Tuno Knob, la deuxième ferme éolienne offshore qui a été construite au Danemark. Tuno Knob, commandée en 1995, a été construite sur l'emplacement d'un ancien site de tir naval. (Greenpeace International)

EDITORIAL

Mettre un terme aux programmes de combustible au plutonium

PAR ARJUN MAKHIJANI¹

Pendant plus d'un demi-siècle, l'establishment nucléaire a promis au monde de lui offrir une énergie issue du plutonium. Celle-ci devait apporter un approvisionnement abondant, durer jusque dans un avenir indéterminé et, dans les années 1950, elle devait même être "trop bon marché pour être mesurée". Après

des dépenses de dizaines de milliards de dollars en recherche et développement et très peu de résultats probants, les programmes visant à l'utilisation de plutonium doivent être considérés comme des échecs.

Il est maintenant largement reconnu que le plutonium est un combustible non rentable. Il n'est pas compétitif si on le compare à l'uranium, et à très peu de

DANS CE NUMÉRO

La lettre sur les effets biologiques des rayonnements ionisants (BEIR VII) ...	3
Une technologie durable : les piles à combustible	10
Cher Arjun : Qu' est-ce que le LNTH?	17

LIRE LA SUITE PAGE 2
VOIR LA PAGE 9 POUR LES ANNOTATIONS

chances de le devenir dans un avenir proche. La technologie clé pour le combustible au plutonium, le réacteur surgénérateur, convertit un combustible non utilisable en réacteur, l'uranium 238, en plutonium 239, qui, lui en est un. Pourtant, les réacteurs surgénérateurs ont eu des résultats des plus lamentables, surtout si l'on considère les niveaux de budgets qui ont été gaspillés pour ces programmes. Près de la moitié des 2600 mégawatts installés pour les réacteurs surgénérateurs dans les années 1990, provenait d'un seul réacteur français, Superphénix, qui a depuis lors été mis à l'arrêt (voir l'article principal sur l'énergie éolienne en page 1).

De surcroît, le procédé utilisé pour extraire le plutonium du combustible irradié, appelé retraitement, est, à de nombreux égards, la partie la plus polluante du cycle du combustible nucléaire. Ce procédé est à l'origine d'une pollution considérable des mers, des rivières et des sols. Cela a abouti à la production de déchets liquides hautement radioactifs, qui doivent être stockés dans des cuves. Entre autres problèmes causés par ces cuves, on trouve le risque d'explosions catastrophiques, telle que celle qui s'est produite dans une cuve de déchets militaires de haute activité en Union soviétique en 1957. Une coupure totale du courant électrique à l'usine de retraitement de la Hague en avril 1980 aurait pu aboutir à une catastrophe similaire, mais ce ne fut heureusement pas le cas grâce à l'utilisation d'un générateur disponible trouvé à l'extérieur du site.

Le récent accident à l'usine de Tokaimura, au cours de la fabrication de combustible à l'uranium moyennement enrichi pour le réacteur surgénérateur expérimental japonais, démontre une nouvelle fois, s'il en était besoin, l'immaturation d'un programme qui a pourtant derrière lui des décennies entières d'efforts. Le système de réglementation japonais n'a pas été capable de garantir qu'il y avait sur place les appareils de mesure de radiation appropriés, des plans d'évacuation adéquats, ou que les ouvriers avaient reçu la formation nécessaire. Il est de toute évidence loin d'être prêt à assurer la responsabilité supplémentaire consistant à garantir la sûreté des réacteurs commerciaux approvisionnés en plutonium mélangé à de l'uranium 238. (On utilise actuellement du combustible frais contenant de l'uranium 235 et de l'uranium 238). Dans le cas d'un accident grave dans un tel réacteur, les retombées engendrées pourraient mettre en péril non seulement les populations locales, mais aussi une grande partie de l'Asie de l'Est.

L'utilisation du combustible au plutonium met en circulation dans l'économie commerciale du plutonium pouvant servir à la fabrication d'armes, accroissant ainsi les risques liés à la prolifération. De vastes quantités de plutonium sont actuellement stockées sur de nombreux sites. A titre d'exemple, trente tonnes de plutonium commercial civil sont entreposées dans environ 12 000 boîtes en acier sur le complexe de Mayak en Russie, et le

fait qu'une partie pourrait se retrouver sur le marché noir provoque bien des inquiétudes. La quantité de plutonium contenue dans seulement deux de ces boîtes serait suffisante pour la fabrication d'une bombe atomique. Actuellement, l'économie russe traversant une crise grave, et le terrorisme ayant gagné le cœur de Moscou, il est grand temps que ce plutonium soit traité de façon à le rendre inutilisable pour la fabrication d'armes (voir le bulletin *Energie et Sécurité* n° 3 et SDA vol 5 n° 4), et pour s'engager dans la direction d'un avenir énergétique plus sûr.

Alors que l'establishment nucléaire a été suffisamment puissant pour assurer un financement continu à la filière du plutonium comme source d'énergie dans plusieurs pays, ceci malgré un bilan et des perspectives lamentables, la clé des énergies alternatives se trouve dans ses aspects économiques. Notre étude sur l'énergie éolienne démontre que des améliorations de cette technologie l'ont d'ores et déjà rendue plus rentable que le plutonium, et que cet avantage économique relatif a toutes les chances de continuer à se creuser dans les années à venir.

LIRE LA SUITE PAGE 9
VOIR LA PAGE 9 POUR LES ANNOTATIONS

Énergie & Sécurité

Énergie et Sécurité est un bulletin sur la non-prolifération, le désarmement et les énergies durables. Il est publié quatre fois par an par:

L'Institut pour la Recherche sur l'Énergie et l'Environnement (IEER)

IEER fournit au public et aux décideurs politiques des études techniques claires et scientifiquement solides dans un grand nombre de domaines. L'objectif de l'IEER est d'apporter une analyse scientifique d'excellente qualité aux questions politiques touchant le public tout en favorisant la démocratisation de la science et un environnement plus sain.

Crédits pour ce numéro

Traduction: Annike Thierry

avec la collaboration de: Jean-Luc Thierry et Annie Makhijani

Mise en page: Cutting Edge Graphics, Washington D.C.

Énergie et Sécurité est gratuit pour tous.

Rédactrice en chef: Lisa Ledwidge

La version anglaise de ce numéro a été publiée en novembre 1999.

Merci à ceux qui nous soutiennent

Nous remercions sincèrement les institutions dont le généreux soutien financier a rendu possible notre projet mondial sur «les dangers des matières nucléaires.»

• W. Alton Jones Foundation •
John D. And Catherine T. MacArthur Foundation • C.S. Fund •
HKH Foundation • New Land Foundation •

Nous remercions également les institutions qui financent notre projet d'aide technique pour les organisations militantes. Nous nous inspirons beaucoup de ce projet pour notre projet mondial.

• Public Welfare Foundation • John Merck Fund •
Ploughshares Fund • Unitarian Universalist Veatch Program at
Shelter Rock • Rockefeller Financial Services • Stewart R. Mott
Charitable Trust • Town Creek Foundation • Beldon II Fund
• DJB Foundation •

Cette lettre, signée par 75 groupes et individus de 17 pays à travers le monde, a été remise au Comité consultatif sur les effets biologiques des rayonnements ionisants (BEIR VII) de l'Académie nationale des sciences lors de sa réunion du 3 septembre 1999 à Washington D.C. (la liste des signataires sera affichée sur notre page web, <http://www.ieer.org>) Cette réunion marquait le lancement d'un projet de trois ans entrepris par le Comité BEIR VII, ayant pour objectif de réévaluer les risques sanitaires pour l'être humain d'expositions à des niveaux faibles de radiations ionisantes. Les travaux du Comité, soutenus par le Ministère de l'énergie des Etats-Unis, par l'Agence pour la protection de l'environnement des Etats-Unis ainsi que par la Commission de la réglementation nucléaire des Etats-Unis, auront sans doute une influence importante sur les normes de protection contre les rayonnements prises au niveau mondial.

ieer

INSTITUTE FOR ENERGY AND
ENVIRONMENTAL RESEARCH

Le 3 septembre 1999

Richard R. Monson, Docteur en Médecine, Président,
c/o Rick Jostes, membre du Bureau
Committee on the Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (BEIR VII)
National Academy of Sciences
2101 Constitution Avenue, NW
Washington, D.C. 20418

Cher Dr. Monson,

Nous vous écrivons à propos de la tâche de votre Comité sur la ré-évaluation des effets des faibles niveaux de rayonnements.

Nous nous réjouissons que le Comité BEIR (Biological Effects of Ionizing Radiation) VII se soit donné pour objectif d' "étudier de grandes quantités de données publiées..concernant les risques pour l'être humain de l'exposition aux faibles niveaux de rayonnements ionisants " (*BEIR VII Project Scope*). Dans le cadre de ce travail, nous nous attendons à ce que le Comité, au cours du processus d'identification des effets biologiques et des facteurs de risques, intégrera l'étude des éléments et interprétations contradictoires existantes. Nous anticipons avec plaisir de pouvoir suivre de près les délibérations progressives du Comité au cours de ce processus important, et de pouvoir y participer.

Le travail effectué par le passé par les comités BEIR a contribué à établir le ton et les termes du débat scientifique sur cette question, et a influencé le processus de définition de normes pour les rayonnements. Par conséquent, nous pensons qu'il est essentiel que soit étudiée la totalité des informations et des questions liées aux effets sanitaires des rayonnements ionisants. Le rapport BEIR V n'a étudié que les risques de cancers, certains aspects des dommages génétiques (bien qu'il n'ait pas fait d'estimation des risques de " maladies d'origine génétique complexe, catégorie considérée comme la plus importante pour les maladies liées aux problèmes génétiques ", p.4) et les retards mentaux résultant de l'exposition in utero.

Il est important que le dispositif BEIR VII s'attaque à la totalité des risques qui n'ont pas été évalués de façon concluante jusqu'ici. Cela devrait comprendre les risques qui ont émergé depuis le rapport BEIR V (comme, par exemple, les effets combinés des rayonnements et d'agents hormonaux actifs, que l'on appelle également " perturbateurs de la glande endocrine ") ainsi que des problèmes qui auraient pu être traités par BEIR V mais ne l'ont pas été. Nous avons établi une liste des problèmes qui nous paraissent les plus importants à étudier. Les problèmes en question sont les suivants :

- **Effets des radionucléides qui traversent le placenta :** Ceci devrait comprendre une étude des effets pour le fœtus en développement (par exemple fausses couches, malformations, et effets sur

LIRE LA SUITE PAGE 4

le développement autres que les retards mentaux) et les effets pour les organes vitaux à différentes phases-clé du développement du fœtus. Cette étude des effets sanitaires sur le fœtus en développement devrait spécifiquement comprendre les effets sur le développement d'organes spécifiques, et les effets indirects des dommages sur des organes tels que la thyroïde. Nous sommes plus particulièrement inquiets de radionucléides tels que l'iode 131, le carbone 14 et le tritium, qui pourraient être incorporés par le fœtus de façon pouvant profondément affecter son bien-être. A titre d'exemple, le tritium, étant une forme d'hydrogène, s'associe à l'oxygène pour former de l'eau. L'eau tritiée se comporte chimiquement comme l'eau ordinaire. En cas d'ingestion, une fraction de tritium est alors incorporée à l'intérieur des cellules du corps humain, y compris le patrimoine génétique. Une telle eau radioactive traverse le placenta. Il est nécessaire d'examiner le risque de fausses couches, d'anomalies de naissance et d'autres problèmes sanitaires résultant de cette exposition in utero. L'évaluation des risques des faibles doses de radiation, réalisée par le Comité BEIR VII, devrait inclure tous ces types de radionucléides ainsi que leurs effets. Si des lacunes sont découvertes dans les connaissances actuelles, elles devraient être identifiées clairement, et leurs implications devraient être détaillées.

- ▶ **Les effets des radiations pour les fœtus de sexe féminin :** Etant donné que les ovules sont formés une seule fois au cours de la vie pendant le développement foetal féminin, le Comité devrait évaluer les effets des radiations sur le système reproductif des fœtus de sexe féminin et les effets possibles de telles radiations sur les enfants de femmes irradiées de cette façon.
- ▶ **Les effets des radionucléides intervenant dans la chimie des êtres vivants :** Les radionucléides tels que le tritium ou le carbone 14 peuvent être incorporés à l'ADN. Lors de la décroissance radioactive, ils se transmutent en d'autres éléments. (Le tritium se transforme en hélium 3 et le carbone 14 en azote 14). De tels événements de transmutation pourraient avoir des conséquences néfastes pour l'ADN. Les effets sanitaires potentiels de telles transmutations doivent être évalués.
- ▶ **Effets synergétiques :** L'exposition aux rayonnements est parfois associée à une exposition à d'autres substances dangereuses. Le Comité doit étudier les effets sanitaires engendrés par une exposition combinée à des substances radioactives et non radioactives. Une attention particulière devrait être accordée à des substances telles que les agents hormonaux actifs qui affectent le système hormonal et la possibilité qu'une telle perturbation puisse augmenter le risque de cancer et d'autres maladies suite à l'exposition aux rayonnements. Réciproquement, l'exposition aux radiations pourrait endommager le système endocrinien, ce qui augmenterait sa vulnérabilité par rapport à d'autres agents pathogènes présents dans l'environnement. La possibilité de variabilité de tels risques doit également être étudiée en fonction de l'âge des sujets exposés (et des cas d'exposition in-utero).
- ▶ **Probité et qualité des données :** Les inventaires des doses reçues par les travailleurs du *Department of Energy* (Ministère de l'énergie) et de l'agence qui l'a précédé aux Etats-Unis, la Commission à l'énergie atomique, sont largement inexacts. Les inventaires de la contamination écologique sont eux-aussi extrêmement défectueux. Nous pouvons l'affirmer pour ce qui concerne les Etats-Unis parce que l'essentiel des archives de données brutes est devenu public suite à des procès, à des demandes faites au nom de l'Acte sur la Liberté de l'Information, etc.. L'utilisation d'études qui acceptent les estimations officielles de doses reçues par les ouvriers ou en dehors du site sans en évaluer les données brutes est pour le moins discutable. Etant donné que les données brutes d'autres pays sont encore actuellement pour l'essentiel tenues secrètes, cela donne encore moins de raison de les accepter au pied de la lettre. Par exemple, il est flagrant que les données sanitaires de l'ex-Union soviétique sont douteuses. Le Comité devrait réétudier ces données ainsi que les questions fondamentales liées à la probité des données, et décider si ces archives peuvent ou non être utilisées pour l'évaluation des risques des faibles niveaux de rayonnements, et dans ce cas comment elles peuvent l'être. Le Comité devrait aussi définir quels critères de qualité des données elle va appliquer aux informations contenues dans les études qu'elle utilise. Dans ce contexte, nous

LIRE LA SUITE PAGE 5

BEIR LETTER

SUITE DE LA PAGE 4

pensons qu'il ne sera pas suffisant d'accepter simplement les études relues par les pairs (*peer-reviewed studies*) comme étant correctes si la cohérence des doses et données sanitaires officielles sous-jacentes n'a pas été évaluée. Enfin, l'impact de la mauvaise classification des expositions aux rayonnements et des effets sanitaires, et des facteurs de sélection liés à la santé, devraient être étudiés lors de l'interprétation de toutes les études épidémiologiques, notamment les études menées sur les survivants de la bombe A.

- **Effets sur les diverses populations :** Le concept d' " homme normal " ou " moyen " est souvent utilisé pour définir les normes de protection contre les radiations. Etant donné le risque de variabilité importante des effets sanitaires concrets sur des populations différentes, le Comité devrait évaluer les marges d'erreurs dans l'évaluation des risques à partir de ce concept. Par exemple, il est essentiel que soit clairement explicité le lien étroit entre l'âge des personnes et la réaction causée par la dose reçue pour différents effets sanitaires, non seulement pour les enfants, mais aussi pour les groupes d'âges plus avancés. On peut également citer comme exemple la variation potentielle de sensibilité aux faibles niveaux de rayonnements parmi des individus qui font pourtant partie d'un même groupe démographique.

Dans nombre de ces domaines, il se pourrait simplement qu'il n'y ait simplement pas assez de connaissances pour permettre d'aboutir à des conclusions scientifiques fiables. Dans de tels cas, le Comité devrait le dire avec clarté et franchise, et recommander l'établissement d'un calendrier de recherches. Si possible, ceci devrait s'accompagner de discussions qualitatives quant aux mécanismes d'effets sanitaires potentiels. Il nous paraît d'une importance cruciale que ces domaines où le risque ne peut être calculé de façon fiable soient clairement identifiés. Si les types de risques peuvent être déterminés qualitativement avec certitude, ils devraient être énoncés. Même si les risques qualitatifs ne peuvent même pas être évalués, cette conclusion même serait très pertinente.

Nous n'avons pas jusqu'ici parlé des problèmes liés aux cancers parce que nous supposons que le Comité s'attaquera à la totalité des documents pertinents liés aux effets carcinogènes. Il serait tout à fait utile que le Comité publie et mette à jour fréquemment la liste de publications qu'elle étudie, afin de nous permettre de suivre la révision effectuée, et d'ajouter, si cela nous paraissait nécessaire ou désirable, des documents à cette liste.

Nous serons heureux d'apporter une contribution scientifique au cours du processus BEIR VII, et espérons que le Comité étudiera de façon exhaustive les problèmes que nous avons soulevés et avec autant de sérieux que s'ils avaient été évoqués par un membre du Comité.

Nous sommes reconnaissants de l'opportunité qui est donnée au public de donner son opinion et nous demandons que cela soit étendu si c'est nécessaire afin que soient traités les problèmes et les éléments que nous souhaitons mettre en avant. Nous attendons votre réponse avec intérêt. Nous sommes à votre disposition pour tout renseignements ou demande d'information complémentaire. Merci d'envoyer vos questions ou réponses à Lisa Ledwige ou Arjun Makhijani. En vous remerciant,

Veuillez recevoir monsieur, l'expression de nos sentiments les plus sincères,

Lisa Ledwige, Coordinatrice des Campagnes Internationales , ieer@ieer.org
Arjun Makhijani, docteur en Sciences, Président, arjun@ieer.org

EOLIEN CONTRE PLUTONIUM SUITE DE LA PAGE 1
 utilisable comme combustible, en plutonium 239 fissile, à un taux permettant, par l'exploitation du réacteur, une augmentation nette de l'approvisionnement en matière fissile. Des dizaines de milliards de dollars supplémentaires ont été dépensés pour le retraitement, une technique utilisée pour séparer et récupérer le plutonium présent dans les combustibles irradiés. Pourtant, l'utilisation du plutonium est encore très loin d'avoir acquis les caractéristiques d'une activité commerciale normale. Même Electricité de France, le plus gros utilisateur de combustible au plutonium (MOX) dans le monde, et *British Nuclear Fuels Limited*, compagnie de retraitement britannique, attribuent une valeur zéro à leurs stocks de plutonium.

Il n'existe à travers le monde aucun programme de réacteurs surgénérateurs au plutonium qui soit viable commercialement. Les deux surgénérateurs les plus importants actuellement en exploitation sont tous deux situés en ex-Union soviétique, et utilisent de l'uranium et non du plutonium comme combustible. Des programmes

de réacteurs surgénérateurs ont été abandonnés dans de nombreux pays, notamment aux Etats-Unis, à cause des problèmes techniques rencontrés, mais aussi du coût et des problèmes liés à la prolifération.

Afin de donner un exemple spectaculaire de l'échec des réacteurs surgénérateurs, on peut citer l'accident de décembre 1995 du réacteur Monju au Japon, qui a été mis à l'arrêt à cause d'une fuite importante et d'un feu de sodium liquide. Le réacteur avait divergé en avril 1994. On peut également citer un exemple notable, celui de Superphénix, qui était le surgénérateur le plus grand du monde. Le 19 juin 1997, l'exploitant de Superphénix a annoncé que l'installation, située en France, serait mise à l'arrêt de façon définitive. Superphénix n'a fonctionné à plein régime que 278 jours entre 1986 et 1997. Le coût total du projet Superphénix a été estimé à quelque 60 milliards de francs (de 1994), couvrant son exploitation jusqu'en 1996 (avant que la fermeture n'ait été annoncée). Les coûts de démantèlement et les frais consécutifs postérieurs à la fermeture de Superphénix, estimés à environ 9,5 milliards de francs, suffiraient à eux seuls à payer les coûts d'investissement pour environ 825 mégawatts (MW) de capacité énergétique en éolien offshore. De surcroît, étant donné l'historique des deux sources d'énergie, si les sommes d'argent allouées à Superphénix avait été consacrées à l'éolien, la production totale d'électricité aurait dépassé celle émise par le réacteur d'un facteur dix, au minimum, en ce laps de temps.

Le développement de ressources d'énergie éolienne offshore permet d'éviter l'impact le plus néfaste de l'énergie éolienne basée à terre : l'utilisation de grandes surfaces de terrain pour le placement de turbines à vent. Bien que la construction en offshore occasionne des frais supplémentaires, ceux-ci sont, au moins en

partie, compensés par des vents plus constants et des vitesses de vents plus élevées, et éliminent également le coût de l'achat de terres. Des vents moins turbulents aboutissent à une usure plus lente des turbines, et, par conséquent, leur donnent une durée de vie plus longue. Les impacts visuels peuvent être réduits ou même éliminés par le choix du site des éoliennes en offshore. Pourtant, le choix du site des

MESURER L'ÉNERGIE

WATT – unité de mesure du taux de production ou de consommation d'énergie correspondant à un joule par seconde. Un cheval-vapeur équivaut à 746 watts.

MÉGAWATT (MW) – unité utilisée couramment pour mesurer la capacité de production des grandes centrales électriques. Correspond à un million de watts.

JOULE – Unité d'énergie correspondant à un watt d'énergie utilisé pendant une seconde.

KILOWATTHEURE (kWh) – Unité d'énergie égale à 3,6 millions de joules. C'est la quantité d'énergie produite par une source d'un kilowatt utilisé pendant une heure.

EOLIEN CONTRE PLUTONIUM : LES COÛTS DE L'ÉLECTRICITÉ

Éléments du coût	Eolien offshore	Combustible d'oxydes mixtes (MOX) -réacteurs à eau ordinaire	Réacteurs surgénérateurs
Coûts d'investissement	29,40 c/kWh	26,60 c/ kWh	53,2 c/ kWh
Coût du combustible (en dehors du retraitement)	non applicable	6,30 c/ kWh	6,30 c/ kWh
Coût du retraitement	non applicable	4,90 c/ kWh	7,0 c/ kWh
Coûts d'exploitation et d'entretien	8,40 c/ kWh	10,50 c/ kWh	10,5 c/ kWh
Coût d'évacuation des déchets nucléaires pour le combustible utilisé MOX	non applicable	1,40 c/ kWh	1,40 c/ kWh
Coûts de démantèlement	0,98 c/ kWh	0,70 c/ kWh	0,70 c/ kWh
Total	38,78 c/ kWh	50,40 c/ kWh	79,10 c/ kWh

LIRE LA SUITE PAGE 7
 VOIR LA PAGE 9 POUR
 LES ANNOTATIONS

turbines éoliennes offshore n'est pas sans poser d'autres types d'impacts néfastes. Entre autres, ces effets négatifs comprennent un impact possible sur les voies de navigation et sur les écosystèmes marins. Il est donc nécessaire d'intégrer des études d'impact aux projets de démonstration.

Le coût de l'électricité produite par les fermes éoliennes offshore a baissé de façon régulière: situé, lors des premiers projets, entre 8.8 cents (62 centimes) et 9.9 cents (69 centimes) le kilowattheure (kWh), il est descendu à environ 5.5 cents (39 centimes) le kWh dans le cas du projet Bockstigen en Suède.³

Les turbines éoliennes en offshore ont été exploitées avec succès et leur coût a décliné de façon très significative au cours des années 1990. Elles se sont également révélées fiables.

Par comparaison, le coût des surgénérateurs n'a pas baissé au cours du temps ou de l'expérience accumulée, bien que le premier réacteur nucléaire au monde à avoir fourni de l'électricité ait été un réacteur surgénérateur (il s'agit du *Experimental Breeder Reactor I* du *Idaho National Engineering Laboratory* en 1951). Le tableau de la page 6 montre une étude comparative effectuée entre les coûts de l'énergie éolienne et ceux de l'utilisation de combustible au plutonium dans des réacteurs à eau ordinaire et des réacteurs surgénérateurs. Les détails des hypothèses sur lesquelles sont basés ces calculs sont exposés en détail dans le rapport de l'IEER sur le site suivant: <http://www.ieer.org/reports/wind/index.html>.

L'un des désavantages de l'énergie éolienne est qu'elle est discontinue. Bien qu'un facteur d'utilisation plus faible de l'éolien - c'est à dire un nombre d'heures d'exploitation en équivalent de pleine capacité moins important - ait été pris en compte dans les coûts calculés ci-dessus, l'énergie éolienne ne peut être utilisée comme source d'énergie unique ou principale sans dispositifs de stockage ou un approvisionnement complémentaire provenant d'autres sources (telles que la biomasse ou l'énergie solaire). De plus, l'énergie éolienne ne pourrait être utilisée pour les transports routiers, à moins d'investissements supplémentaires, mais c'est aussi le cas pour le plutonium.

Admettons, pour les besoins de la démonstration que

TABLEAU DE CONVERSION DES UNITÉS DE MESURE D'ÉNERGIE

Unité de départ	Unité recherchée	Multiplier le chiffre de départ par
Btu	joules	1055
joules/seconde	Watts	1
Watts	Btu/heure	3,413
Puissance	énergie	temps

AU JAPON : DU NOUVEAU POUR L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

En février 1999, près d'un mois après la publication par l'IEER de son rapport "Énergie Éolienne contre Plutonium" (*Wind vs. Plutonium*), le gouvernement japonais a annoncé le lancement d'une étude de production d'énergie basée en mer et comprenant l'utilisation de l'énergie éolienne offshore. Le ministère du commerce international et de l'industrie et le ministère des transports du Japon étudient actuellement la possibilité d'un développement d'éoliennes offshore et d'autres installations qui utiliseraient à la fois l'éolien et la force des vagues pour créer de l'énergie. Les ministères comptent mener des recherches afin de trouver plusieurs sites potentiels d'implantation de telles installations de production d'énergie basées en mer, et espèrent pouvoir en démarrer la construction aux environs de 2002. La force du vent, les droits de pêche et l'impact sur le paysage sont certains des critères qui seront utilisés pour le choix des sites. Le Japon compte faire passer sa production d'énergie éolienne de 14 000 kilowatts pour l'année fiscale 1996 à 300 000 kilowatts pour l'année fiscale 2010.

Source: Jiji Press Ticker Service, 6 février 1999

l'autosuffisance énergétique soit un objectif cohérent pour la politique énergétique d'un pays, l'aspect le plus important de cet objectif est d'avoir assez de combustible pour le transport. Cela s'explique par le fait que le pétrole est le plus sensible aux fluctuations de prix et à l'instabilité en matière d'approvisionnement, tout en étant à la fois très difficile à remplacer au court et au moyen terme. Pourtant, le remplacement du pétrole par l'éolien ou par le plutonium ne peut se faire que par des transformations majeures du système de transport si bien qu'aucune de ces deux sources d'énergie ne détient, a priori, un avantage sur l'autre en ce qui concerne l'objectif d'autosuffisance énergétique dans le secteur du transport.

Il y a deux façons d'utiliser l'électricité dans les transports - qu'elle provienne de l'énergie éolienne, du plutonium, ou de toute autre source d'énergie. Elle doit être utilisée soit pour alimenter des véhicules électriques, soit être convertie en hydrogène pour être utilisée dans les véhicules fonctionnant par piles à combustibles (voir page 10).

Par conséquent, l'utilisation de l'énergie éolienne ou du plutonium dans le transport de véhicules nécessiterait aussi des transformations massives soit par conversion pour des voitures électriques, soit par l'utilisation de piles à combustibles. De tels changements risquent

LIRE LA SUITE PAGE 8
VOIR LA PAGE 9 POUR LES ANNOTATIONS

EOLIEN CONTRE PLUTONIUM SUITE DE LA PAGE 7
d'être nécessaires de toute façon pour des raisons de rendement, de réduction de la pollution de l'air dans les villes, et/ou la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il semblerait actuellement que les piles à combustible, qui utilisent l'hydrogène comme combustible, seraient probablement le moyen le plus efficace et le moins polluant d'aboutir à la transformation des transports (voir le tableau de la page 12). Ainsi, nous avons comparé le coût de l'utilisation de l'éolien à celui du plutonium comme source d'énergie pour un secteur des transports routiers basé sur les piles à combustible.

Le coût de l'hydrogène produit à partir de l'énergie éolienne, qui est d'environ 5 cents (35 centimes) le kilowattheure d'électricité, passerait à environ \$33 (231 francs) le gigajoule (GJ) pour un véhicule fonctionnant avec une pile à combustible, soit l'équivalent de 3 f le litre pour un véhicule fonctionnant à l'essence. Le coût équivalent de l'hydrogène produit par réacteurs surgénérateurs serait d'environ le double de ce prix \$60, (420 francs, le gigajoule), ou même davantage.

Notre évaluation des problèmes à long terme associés à l'énergie éolienne et à la technologie des surgénérateurs indique que, même si l'on considère les coûts additionnels causés par le stockage de l'énergie nécessaire afin de compenser la nature discontinue du vent, l'énergie éolienne paraît plus avantageuse que celle des réacteurs surgénérateurs.

Recommandations

Le plutonium aurait dû, depuis longtemps, être abandonné en tant que source d'énergie au profit des sources d'énergie renouvelables. La Commission Paley, nommée par le président Truman avait, déjà en 1952, abouti à la conclusion que les énergies renouvelables étaient de loin plus prometteuses que l'énergie nucléaire, ceci avant même que l'ère de l'énergie nucléaire commerciale ait été lancée. Le combustible au plutonium et les réacteurs surgénérateurs ont été, à tout point de vue, les acteurs les plus importants de l'échec du mythe de l'énergie nucléaire. Maintenant que l'énergie éolienne, et plus particulièrement l'énergie éolienne offshore, est à la fois rentable et disponible, il n'existe aucun argument réaliste qui puisse justifier la poursuite des investissements publics pour la technologie de l'énergie au plutonium. Ces investissements doivent être stoppés immédiatement.

En ce qui concerne les technologies énergétiques proches de la commercialisation et paraissant cohérentes d'un point de vue écologique et/ou de sécurité de l'approvisionnement énergétique, les fonds publics doivent être investis de façon à encourager à la fois le rendement et l'investissement de fonds privés dans la recherche et le développement afin d'abaisser les coûts. Il est également tout à fait souhaitable qu'un nombre significatif de systèmes de production d'énergie

éolienne soit mis en place à court et moyen terme afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'atteindre d'autres objectifs écologiques et de non-prolifération. Le problème restant à traiter est de savoir comment les fonds des contribuables doivent être investis afin que le coût de réalisation de ces objectifs recherchés puisse être minimisé.

Une étude des politiques mises en oeuvre par le gouvernement américain par le passé pour encourager l'énergie éolienne révèle que l'achat, dans le cadre d'un appel d'offres ouvert, par les autorités publiques et/ou des entreprises, de niveaux déterminés de capacité de production, permettrait d'atteindre les objectifs recherchés visant à stimuler une transition vers un avenir énergétique plus écologique et sans risques de prolifération. Le gouvernement définirait à l'avance les emplacements, y compris les régions offshore, et les partenaires privés auraient à faire des offres concernant l'approvisionnement de l'électricité sur une période allant de 15 à 20 ans à des prix fixés à l'avance. Cela encouragerait la recherche et le développement privés, ainsi qu'un marché de l'offre et de la demande compétitif axé sur le rendement, qui utiliserait efficacement les fonds publics et réduirait les coûts de façon systématique.

Pour ce qui concerne les Etats-Unis, nous proposons que le gouvernement achète 1 000 mégawatts par an de capacité éolienne et ce au moins jusqu'en 2010, date à laquelle une évaluation complète serait menée. Des sites pourraient être sélectionnés en fonction de critères tels que la force et la fréquence du vent, les besoins énergétiques régionaux, l'impact minimum sur l'usage des sols et les écosystèmes des sites concernés. Les offres devraient exiger un rendement garanti sur une période de temps donnée.

Ce système serait, dans une certaine mesure, comparable à la façon dont sont proposés les baux pour l'exploration pétrolière sur le marché de l'offre et de la demande aux Etats-Unis, à la différence que, dans le cas de l'éolien, la taille approximative des ressources est d'ores et déjà connue. Par conséquent, des contrats seraient passés pour l'approvisionnement concret d'électricité produite par la force du vent (ceci au lieu de l'exploration, qui est l'objectif des baux concernant le pétrole).

Le ministère de l'Energie des Etats-Unis a annoncé avoir pour objectif 10 000 mégawatts d'énergie éolienne mis en service aux Etats-Unis d'ici à l'an 2010. Cet objectif serait atteint essentiellement par des réductions d'impôts et un programme fédéral visant à acheter suffisamment d'énergie éolienne pour approvisionner 5 pour cent de l'utilisation du gouvernement fédéral d'ici à l'an 2010. Bien que l'objectif visant à augmenter largement la capacité éolienne d'ici à l'an 2010 soit tout à fait raisonnable, la méthode choisie pourrait ne pas aboutir à une réduction des coûts aussi importante que par la méthode suggérée par l'IEER (voir le rapport de

LIRE LA SUITE PAGE 9
VOIR LA PAGE 9 POUR LES ANNOTATIONS

D'autres technologies énergétiques, notamment le développement rapide des piles à combustible, à la fois comme sources d'électricité fixes et pour les véhicules, ont contribué à faire avancer la vision d'un monde qui peut simultanément atteindre des objectifs économiques et écologiques, si ceux-ci sont poursuivis avec réelle motivation et cohérence. L'énergie éolienne et les piles à combustible sont deux des technologies-clé. Une fois situées dans le contexte des technologies existantes à haut rendement, telles que la cogénération de l'électricité et de la chaleur, ou les centrales à cycle combiné fonctionnant au gaz naturel (voir E&S, n°5 et SDA vol 6, n° 3), ou encore les voitures hybrides utilisant à la fois l'électricité et l'essence (voir l'encart de la page 14), on peut démontrer qu'il est possible de répondre à des besoins énergétiques raisonnables, de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de réduire la pollution de l'air dans les villes, et de poursuivre l'élimination des problèmes de prolifération et autres problèmes de sûreté associés au système énergétique mondial actuel. Une politique énergétique cohérente qui contribuerait à une réduction relativement modeste des coûts des technologies-clé est un ingrédient crucial qui fait défaut au système actuel, et nous permettrait de nous rapprocher de cet avenir plus désirable.

En 1952, la Commission Paley, nommée par le président Truman, a considéré que les sources d'énergies renouvelables permettraient de répondre bien plus efficacement que l'énergie nucléaire aux besoins énergétiques et de prévenir des dislocations économiques causées par des interruptions éventuelles de l'approvisionnement en pétrole étranger. Mais, peu de temps après, le gouvernement américain a décidé de passer outre cette recommandation et de choisir la poursuite de l'énergie nucléaire, qui faisait déjà largement partie intégrante de sa campagne de propagande de la guerre froide.

Les rêves de la guerre froide où l'on voyait le plutonium comme une source d'énergie " magique " auraient dus depuis bien longtemps être abandonnés au profit de sources d'énergies renouvelables et de technologies qui vont radicalement transformer l'efficacité de la conversion et de l'utilisation énergétique. Ces technologies doivent être développées avec la même détermination que celle dont a bénéficié l'énergie nucléaire dans les premières décennies de la guerre

froide. Cette fois-ci, il s'agit d'une vraie course contre la montre. De nombreux facteurs, tels que la fréquence plus importante d'événements climatiques graves, viennent montrer que le monde est encore loin d'avoir gagné la guerre contre le réchauffement planétaire.

Il est impératif que les gouvernements les plus puissants mettent de côté leurs projets électoralistes d'utilisation du plutonium, avec lesquels ils ont si longtemps alimenté leur establishment nucléaire. Il est nécessaire que les pays ayant d'importants programmes de combustibles fossiles et/ou nucléaires prennent un engagement résolu à utiliser leurs fonds publics pour l'achat d'énergie éolienne, de véhicules alimentés par piles à combustible et de piles à combustibles fixes, d'énergie solaire et de cogénération pour les bâtiments publics. Le meilleur moyen institutionnel pour pousser les gouvernements à acquérir ces technologies est l'adoption de politiques d'approvisionnement qui leur ouvriront un marché stable, tout en encourageant la compétition qui rendra possible une réduction progressive des coûts au cours du temps.

Le gouvernement américain doit affirmer un leadership dans ce domaine beaucoup plus qu'il ne l'a fait jusqu'à présent, parce que les Etats-Unis sont, de loin, le pays émetteur de la plus grosse quantité de dioxyde de carbone, le plus grand producteur d'énergie nucléaire, et qui a la plus grande influence diplomatique et économique au monde. Pourtant, jusqu'ici, le gouvernement américain s'est montré incapable de tenir ses engagements sur la réduction des émissions de dioxyde de carbone, engagements qu'il avait pris lors du sommet écologique mondial de 1992, et semble loin pour le moment des obligations qu'il a pris selon le Protocole de Kyoto (le traité mondial pour la réduction des émissions de dioxyde de carbone - voir E&S n° 5 SDA vol.6 n° 3 - qui doit prochainement être ratifié par le Sénat américain). Au vu de l'intérêt de ces technologies, et de la nécessité de rattrapage suite à ces échecs successifs, un investissement de cinq à dix milliards de dollars par an pour les technologies des énergies renouvelables, y compris la conversion énergétique efficace utilisant des piles à combustibles, est tout à fait justifié. L'essentiel de cette somme sera compensée directement sous la forme de coûts énergétiques réduits.



¹ Basé en partie sur la préface par Arjun Makhijani du rapport de l'IEER sur l'énergie éolienne, rédigé par Marc Fioravanti (voir l'article principal, page 1).

EOLIEN CONTRE PLUTONIUM SUITE DE LA PAGE 9
l'IEER sur l'éolien pour un exposé plus complet).

¹ *Wind Power Versus Plutonium : An Examination of Wind Energy Potential and A Comparison of Offshore Wind Energy to Plutonium Use in Japan* (IEER, janvier 1999), est disponible sur internet sur le site

suyant : <http://www.ieer.org/ieer/reports/wind/index.html>. Toutes les références sont également fournies dans ce rapport, à moins que cela ne soit précisé.

² Voir le site internet de l'IEER, <http://www.ieer.org> pour les publications ayant trait au plutonium.

³ Une valeur de 7 F pour un dollar a été utilisée.

Portrait d'une technologie pour un développement durable : les piles à combustible

La NASA (*US National Aeronautics and Space Administration*) utilise cette technologie pour faire fonctionner ses navettes spatiales. Les ordinateurs de la *First National Bank of Omaha* l'utilisent également comme source d'énergie. Certains des bus de transport en commun de Chicago l'utilisent aussi.

Il s'agit des piles à combustible. Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui produi-

sent de l'énergie électrique sans combustion. Elles produisent de l'électricité par un processus chimique, de façon tout à fait comparable aux piles classiques. Mais les produits chimiques utilisés par les piles à combustible sont l'hydrogène et l'oxygène élémentaires, et cette réaction chimique aboutit à la formation d'eau. On peut également utiliser du gaz naturel, bien que

LIRE LA SUITE PAGE 11

CATÉGORIES DE PILES À COMBUSTIBLE

Acide phosphorique. Cette catégorie de pile à combustible est la plus développée commercialement. Elle est actuellement utilisée dans des applications très variées, telles que les hôpitaux, les cliniques, les hôtels, les immeubles de bureaux, les écoles, les centrales électriques, et un terminal aéroportuaire. Les piles à combustible utilisant de l'acide phosphorique produisent de l'électricité avec un rendement de plus de 40% - et près de 85% si la vapeur produite par la pile à combustible est utilisée pour la cogénération - à comparer au rendement de 30% des moteurs à combustion interne les plus efficaces. La température nécessaire pour son fonctionnement se situe aux alentours de 200 degrés C. Ces piles à combustible peuvent également être utilisées dans des véhicules plus grands, tels que les bus ou locomotives.

Membrane échangeuses de protons (PEM, Proton Exchange Membrane) Ces piles à combustible fonctionnent à une température relativement basse (environ 90 degrés C), ont une densité énergétique forte, peuvent varier leur émission d'énergie rapidement en fonction des changements de la demande, et sont adaptées pour des applications nécessitant un démarrage rapide - telles que les automobiles -. Selon le ministère de l'Énergie des États-Unis, " ce sont les candidats principaux pour les véhicules légers, les bâtiments, et potentiellement pour des applications beaucoup plus petites telles que le remplacement de piles rechargeables dans les caméras vidéo."

Carbonate fondu. Les piles à combustible à carbonate fondu ont un rendement combustible/production d'électricité élevé et apportent en outre la possibilité de consommation de combustibles dérivés du charbon. Cette pile fonctionne à environ 650 degrés C.

Oxydes solides. Il s'agit là aussi d'une pile à combustible très prometteuse. Elle pourrait être utilisée dans des applications de grande taille et de haute capacité énergétique, y compris des centrales électriques de grande taille. Certains de ses concepteurs envisagent également d'utiliser les piles à oxydes solides dans des véhicules à moteur: Un test sur 100 kilowatts est en cours de préparation en Europe. Deux petites unités de 25 kilowatts sont déjà exploitées au Japon. Un système à oxydes solides utilise généralement une matière en céramique

solide à la place d'un électrolyte liquide, ce qui permet d'atteindre des températures de fonctionnement de 1000 degrés C. Le rendement de production énergétique atteindrait jusqu'à 60%. Un type de pile à combustible à oxyde solide utilise un faisceau de tubes d'un mètre de long chacun. On trouve d'autres variantes de cette pile, par exemple un disque comprimé qui ressemble au couvercle d'une boîte de conserve.

Alcaline. Ces piles à combustible, utilisées depuis longtemps par la NASA pour leurs missions spatiales, peuvent atteindre un rendement de production énergétique allant jusqu'à 70%. Elles utilisent de l'hydroxyde de potassium alcalin comme électrolyte. Jusqu'à tout récemment, ces piles étaient trop coûteuses pour les applications commerciales, mais plusieurs entreprises étudient actuellement les possibilités de réduction des coûts et l'amélioration de la flexibilité de leur fonctionnement.

Autres piles à combustible. Les piles à combustible à utilisation directe du méthanol (*DMFC - Direct Methanol Fuel Cells*) ne font partie que depuis peu de la famille des piles à combustible. Ces piles sont semblables aux piles PEM dans la mesure où elles utilisent toutes deux une membrane polymère comme électrolyte. Mais, dans le cas des DMFC, le catalyseur anode retire lui-même l'hydrogène à partir du méthanol liquide, ce qui élimine le besoin d'un reformeur de combustible. On prévoit des rendements d'environ 40% pour ce type de pile à combustible, qui fonctionnerait généralement à des températures situées entre 50 et 90 degrés C. Des rendements plus élevés sont obtenus à des températures plus importantes. Les piles à combustibles régénératrices, également arrivées depuis peu dans la famille des piles à combustible, pourraient devenir très intéressantes en tant que forme de production d'électricité en circuit fermé. L'eau est divisée en hydrogène et oxygène par un électrolyseur fonctionnant à l'énergie solaire. L'hydrogène et l'oxygène servent alors à alimenter la pile à combustible qui génère de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. L'eau est alors renvoyée à l'électrolyseur solaire, et le processus recommence. Des recherches sont actuellement menées sur ces types de piles à combustible par la NASA et d'autres organisations au niveau mondial.

Encadré réédité avec l'autorisation de *Fuel Cells 2000*, site web : <http://216.51.18.233/fctypes.html>, consulté le 15 septembre 1999.

LES PILES À COMBUSTIBLE SUITE DE LA PAGE 10

l'utilisation de combustibles à hydrocarbures s'accompagne, bien entendu, d'une certaine quantité d'émissions de dioxyde de carbone.

Etant donné qu'il est possible de rendre les piles à combustible à la fois très efficaces et propres, elles paraissent très prometteuses comme source d'énergie cohérente d'un point de vue écologique, qui pourrait aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'autres formes de pollution. L'obstacle principal qui empêche leur utilisation à grande échelle est leur coût élevé en comparaison avec les autres systèmes de production d'électricité ou de propulsion de véhicules.

Historique

La première pile à combustible a été mise en oeuvre par Sir William Groves en 1839. Groves démontra que le processus d'électrolyse - la séparation de l'eau en hydrogène et en oxygène par contact avec un courant électrique - pouvait être inversé. C'est à dire que l'hydrogène et l'oxygène pouvaient être recombinés afin de produire de l'électricité.

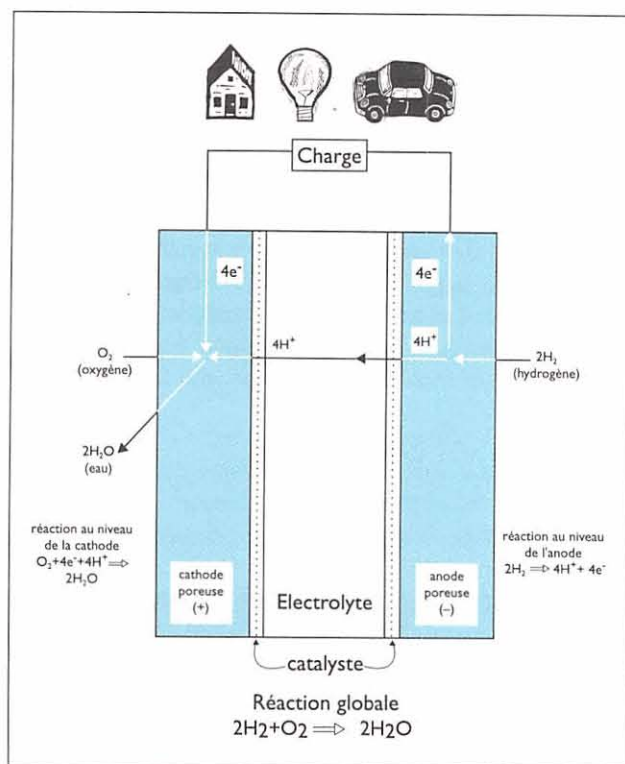
Quelques scientifiques et ingénieurs ont travaillé avec assiduité sur les piles à combustibles après cette première découverte, mais, au cours de la deuxième moitié du 19ème siècle, l'invention du moteur à combustion interne et le développement d'une infrastructure pour l'extraction des ressources pétrolières ont alors éclipsé le développement de la pile à combustible. Le coût des piles à combustible a encore davantage empêché son développement.

Le développement des piles à combustible a connu une relance dans les années 1950 lorsque la NASA a choisi cette technologie pour répondre à la nécessité d'avoir un générateur d'électricité compact pour ses missions spatiales. A la suite de ces investissements, les missions Apollo et Gemini ont été alimentées par piles à combustible, et le *Space Shuttle* utilise actuellement lui-aussi cette même source d'énergie.

Les piles à combustible sont encore pour l'essentiel à l'état expérimental, mais quelques entreprises les commercialisent déjà.¹ C'est seulement au cours des dix dernières années environ que des avancées significatives ont été accomplies dans la technologie des piles à combustible commerciales. Certaines de ces avancées sont présentées page 15.

Le fonctionnement des piles à combustible

Les piles à combustible sont comparables à des batteries classiques dans la mesure où elles produisent de l'électricité directement à partir d'une réaction chimique. Les moteurs à combustion interne, eux, brûlent du



combustible, et par conséquent produisent de la chaleur, qui est alors convertie en énergie mécanique. A moins que la chaleur contenue dans les gaz d'échappement soit utilisée d'une façon quelconque, (par exemple, pour le chauffage ou la climatisation), les moteurs à combustion interne ont un faible rendement. A titre d'exemple, on prévoit actuellement que le rendement des piles à combustible actuellement en développement et destinées à être utilisées dans des véhicules, sera le double de celui des moteurs à essence classiques utilisés actuellement dans les voitures.

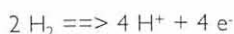
Bien que les batteries classiques tout comme les piles à combustible produisent de l'électricité par moyens électrochimiques, elles répondent à deux fonctions très différentes. Une pile classique est un appareil servant à stocker de l'énergie : l'électricité qu'elle produit est le résultat d'une réaction chimique de matières qui sont déjà stockées à l'intérieur de celle-ci. Une pile à combustible ne stocke pas d'énergie, mais elle convertit en électricité une partie de l'énergie d'un combustible fourni de l'extérieur. A cet égard, la pile à combustible ressemble davantage à une centrale électrique conventionnelle.

Il existe différentes sortes de piles à combustible (voir le tableau de la page 10). La pile à combustible la plus simple consiste en une membrane spéciale que l'on appelle électrolyte. Des électrodes en poudre sont déposées sur les deux surfaces opposées de la mem-

LIRE LA SUITE PAGE 12
VOIR LA PAGE 16 POUR LES ANNOTATIONS

LES PILES À COMBUSTIBLE SUITE DE LA PAGE 11
brane. Cette disposition - un électrolyte entouré de deux électrodes - correspond à une pile individuelle. On ajoute alors de l'hydrogène d'un côté (l'anode) et de l'oxygène (de l'air) de l'autre (au niveau de la cathode). Cela produit alors différentes réactions chimiques au niveau de chaque électrode (voir le schéma page 11).

Au niveau de l'anode, il y a dissociation de l'hydrogène en un mélange de protons et d'électrons. Dans certaines piles à combustible, les électrodes sont entourées d'un catalyseur, généralement constitué de platine ou d'un autre métal précieux, qui facilite cette dissociation :



H₂ = molécule d'hydrogène diatomique, c'est-à-dire l'hydrogène sous forme gazeuse

H⁺ = hydrogène ionisé, c'est-à-dire un proton

e⁻ = électron

La clé de la pile à combustible tient à ce que l'électrolyte laisse passer les protons (en direction de la cathode), mais arrête les électrons. Les électrons passent par un chemin extérieur pour arriver jusqu'à la cathode. Ce mouvement d'électrons constitue un courant électrique, qui peut être utilisé pour faire fonctionner un appareil externe à la pile à combustible, comme par exemple un moteur électrique ou une ampoule électrique. On donne à un tel appareil le nom générique de "charge".

Au niveau de la cathode de la pile à combustible, les protons (qui ont déjà traversé l'électrolyte) et les électrons (qui ont traversé la charge externe) sont "réunis" et réagissent avec l'oxygène fourni, en formant de l'eau, H₂O :

LIRE LA SUITE PAGE 13
VOIR LA PAGE 16 POUR LES ANNOTATIONS

COMPARAISON ENTRE LES ÉMISSIONS PRODUITES PAR LES VÉHICULES À PILES À COMBUSTIBLES, LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES ALIMENTÉS PAR BATTERIE ET LES VÉHICULES CONVENTIONNELS

Estimation en pourcentage des changements concernant les polluants de référence et les gaz à effet de serre par rapport à un combustible de référence. Projection pour l'an 2000¹

Véhicule	Polluants de référence ²					Gaz à effet de serre
	Gaz organiques (à l'exception du méthane) ³	Monoxyde de carbone (CO)	Oxydes d'Azote (NOx)	Oxydes de Soufre (SOx)	Matière sous forme de particules	
Information de référence : Moteurs à combustion interne à essence (en grammes par kilomètre)	0,48	3,81	0,28	0,035	0,01	282,5
Véhicule électrique à accumulateur	-95	-99	-56	+321	+153	-37
Véhicule électrique à pile à combustible (hydrogène comprimé fourni par le gaz naturel)	-100	-100	-100	-100	-100	-65
Véhicule électrique à pile à combustible (hydrogène comprimé fourni par l'énergie solaire)	-100	-100	-100	-100	-100	-94
Véhicule électrique à pile à combustible ou à batterie (hydrogène fourni directement par l'énergie solaire)	-100	-100	-100	-100	-100	-100

Source : *Hydrogen Fuel Cell Vehicles, Briefing Paper, Union of Concerned Scientists, Cambridge, Massachusetts, février 1995.*

1. Les chiffres comprennent les émissions directes des véhicules ainsi que les émissions indirectes engendrées par la production, le stockage et la distribution des combustibles.
2. Les polluants de référence sont ceux choisis par la réglementation du *Clean Air Act* (Loi sur l'air): les hydrocarbures, le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote, les oxydes de soufre, et les matières sous forme de particules. Les effets sanitaires de ces polluants comprennent des maux de tête, des dommages physiologiques et respiratoires.
3. Comprennent tous les hydrocarbures sauf le méthane.

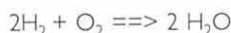


Ballard Power Systems a choisi les bus de transport en commun comme première application de transport pour sa technologie de pile à combustible. Le bus de Ballard, qui est aussi le premier bus de transport en commun alimenté par pile à combustible, a commencé à fonctionner en juin 1993. Il s'agissait d'un bus de plus de dix mètres trente de long, avec un moteur à pile à combustible Ballard de 125 chevaux (90 kilowatts), alimenté par hydrogène.

LES PILES À COMBUSTIBLE SUITE DE LA PAGE 12



La réaction globale de la pile à combustible est la suivante :



Les piles à combustible fonctionnent en utilisant de l'hydrogène comme combustible et de l'oxygène provenant de l'air. L'hydrogène peut être fourni directement ou par extraction à partir d'une alimentation externe telle que le gaz naturel, l'essence ou le méthanol. Lorsque la source n'est pas de l'hydrogène, elle doit alors être convertie par un processus chimique afin d'en extraire l'hydrogène - c'est un procédé que l'on appelle "reformage".² L'hydrogène peut également être produit à partir d'ammoniaque, de sources alternatives telles que les gaz provenant de décharges ou des usines de traitement des eaux usées, mais aussi par électrolyse de l'eau, qui utilise l'électricité pour la diviser en ses éléments, l'hydrogène et l'oxygène.³ L'essentiel de la technologie des piles à combustible destinées aux véhicules utilise actuellement du méthanol.

Diverses méthodes ont été développées pour reformer le combustible en hydrogène pour les piles à combustible. Le ministère de l'Énergie des États-Unis a développé un convertisseur de combustible qui sert, dans un véhicule, à reformer l'essence afin de fournir l'hydrogène nécessaire à une pile à combustible présente à bord du véhicule.⁴ Un "reformeur" de forme compacte, faisant un dixième de la taille des appareils actuels, a été mis au point et présenté par des chercheurs du Laboratoire National de *Pacific Northwest* des *US Northwest Power Systems*, et le Laboratoire National de *Sandia* a, quant à lui, présenté un reformeur de combustible qui convertit le diesel en hydrogène destiné aux piles à combustible.⁵

Une seule pile à combustible produit environ 0,7 à 1,0 volt. Pour produire des voltages supérieurs, les piles à combustibles sont "empilées", c'est à dire connectées en série. Pour obtenir des courants plus élevés, des piles à combustibles empilées en série sont connectées en parallèle. C'est l'association d'"empilements" de piles à combustibles, d'un convertisseur de combustible, d'une alimentation en air, d'un système de refroidissement et de moyens de contrôle qui crée un moteur de pile à combustible. Le moteur peut alors faire fonctionner un véhicule, une centrale électrique fixe, ou un générateur d'électricité portable.⁶ La taille des piles à combustible varie selon l'application, le type de pile à combustible et le combustible utilisé. A titre d'exemple, chacune des quatre centrales électriques fixes individuelles, de 200 kilowatts chacune, utilisées par la banque d'Omaha, a environ la taille d'une remorque d'un poids lourd.⁷

Applications

Les piles à combustible peuvent être utilisées pour faire fonctionner à la fois des appareils fixes et mobiles. Suite aux nouvelles normes plus strictes concernant les émissions de gaz aux États-Unis, des fabricants automobiles, parmi lesquels *DaimlerChrysler*, *Toyota*, *Ford*, *General Motors*, *Volkswagen*, *Honda* et *Nissan*, sont en train de tester ou de présenter des nouveaux prototypes fonctionnant avec des piles à combustible.

LIRE LA SUITE PAGE 14
VOIR LA PAGE 16 POUR LES ANNOTATIONS

INTERNET RESOURCES ON FUEL CELLS

American Methanol Institute – <http://www.methanol.org>
Ballard Power Systems – <http://www.ballard.com>
California Fuel Cell Partnership – <http://www.drivingthefuture.org>
Distributed Power Coalition of America – <http://www.dpc.org/>
Energy Efficiency and Renewable Energy Network, US Department of Energy – <http://www.eren.doe.gov/RE/hydrogen/>
European Fuel Cell Forum – <http://www.efcf.com/>
Fuel Cells 2000 – <http://www.fuelcells.org>

Hydrogen & Fuel Cell Letter – <http://www.hfcletter.com>
ONSI Corporation – <http://www.onsicorp.com>
US Department of Defense Fuel Cell Demonstration Program – <http://www.dodfuelcell.com>
US Department of Energy Fuel Cell Program – <http://www.ott.doe.gov/oaat/fuelcell.html>
World Fuel Cell Council – <http://members.aol.com/fuelcells/1.htm>

VÉHICULES ÉLECTRIQUES, HYBRIDES ET À PILES À COMBUSTIBLE

La plupart des véhicules électriques utilisent un moteur électrique alimenté par batterie comme source d'énergie. L'avantage principal des véhicules électriques à batterie est l'absence d'émission à partir du pot d'échappement. Pourtant, ils engendrent bien des émissions par d'autres biais, comme par exemple au niveau de la centrale électrique, lors du rechargement et lors de la production des batteries, qui pour la plupart contiennent des matières toxiques. Les batteries sont également lourdes, elles doivent être remplacées au bout de quelques années, et prennent des heures à être chargées. Le rendement des véhicules électriques à batterie s'est amélioré, mais ils sont encore loin d'apporter une offre séduisante.

Un véhicule électrique hybride associe deux sources d'énergie, comme par exemple un moteur électrique alimenté par batterie et un moteur à combustion interne conventionnel. Un système informatisé optimise l'association énergétique provenant du

moteur conventionnel et du moteur électrique en fonction des conditions de conduite. Les véhicules hybrides ont un bien meilleur rendement que les voitures à essence conventionnelles.

Certains des plus gros fabricants de voitures des Etats-Unis développent actuellement des véhicules électriques hybrides dont la commercialisation serait possible. Certains travaillent en collaboration sur une voiture prototype qui utiliserait des piles à combustible pour produire de l'énergie permettant d'alimenter le moteur électrique de l'automobile.

Sources : Université de Humboldt State, *Schatz Energy Research Center*, <http://www.humboldt.edu/~serc/faq.html>, consulté le 1er octobre 1999.

Information Please, sur le site : <http://www.infoplease.com/ipa/A0004678.html>, consulté le 1er octobre 1999; *Frequently Asked Questions (FAQ), Hypercars, Rocky Mountain Institute*, <http://www.rmi.org/faq/hyperq.html>, consulté le 1er octobre 1999, *Hybrid Car, Toyota*, <http://www.toyota.com>, consulté le 13 octobre 1999.

LES PILES À COMBUSTIBLE SUITE DE LA PAGE 13

On prévoit que les premières voitures à piles à combustible disponibles dans le commerce seront sur le marché d'ici à l'an 2004 ou 2005.⁸

Un pas significatif a été franchi en juin 1993 pour la technologie des piles à combustible avec la présentation d'un bus de démonstration de 10 mètres de long par la compagnie *Ballard Power System*, fonctionnant avec un moteur utilisant une pile à combustible à l'hydrogène de 90 kilowatt (voir photo page 13). Depuis lors, de nombreux types et générations de véhicules de transport en commun utilisant des piles à combustible ont été développés et utilisés. Trois petites voitures de golf utilisant une pile à combustible à l'hydrogène ont été utilisées à Palm Desert, en Californie, depuis la fin de l'année 1996. Les villes de Chicago, Illinois, Vancouver, British Columbia et Oslo, en Norvège, testent actuellement "sur le terrain" des bus de transport en commun utilisant des piles à combustible. Des taxis fonctionnant avec des piles à combustible alcaline sont également testés dans les rues de Londres.⁹

Des applications fixes de la technologie des piles à combustible sont actuellement présentées mais elles ne sont pas encore disponibles sur le marché. *La First National Bank of Omaha*, dans le Nebraska, utilise un système basé sur une pile à combustible pour faire fonctionner ses ordinateurs, ceci parce que ce système est plus fiable que le vieux système de la banque, qui utilisait de l'énergie provenant du réseau et soutenue par des piles classiques.¹⁰ Le système de piles à combustibles commercial le plus important au monde, de 1,2 mégawatts, sera prochainement installé dans un centre de tri du courrier en Alaska.¹¹ Des ordinateurs portables, des usines de traitement des eaux usées et des

distributeurs fonctionnant avec des piles à combustible sont actuellement en cours de tests et de présentation.¹²

Avantage et Inconvénients

Les piles à combustibles bénéficient de plusieurs avantages. Alors que les moteurs à combustion interne utilisés actuellement ont un rendement de seulement 12 à 15%, celui des piles à combustible est d'environ 50%.¹³

Les piles à combustible peuvent également maintenir leurs niveaux de rendement élevés même lorsqu'elles fonctionnent seulement à une fraction de leur capacité totale, ce qui leur donne un avantage non négligeable sur les moteurs à essence.

La nature modulaire des piles à combustible signifie que la capacité d'une centrale électrique à pile à combustible peut être augmentée par le simple ajout "d'empilements"; ce qui minimise la capacité non utilisée, et permet à l'approvisionnement de mieux correspondre à la demande. Etant donné que le rendement d'une série de piles à combustible est déterminé par le rendement de chacune des piles individuelles, les petites centrales électriques à piles à combustibles sont aussi efficaces que les grandes centrales. La chaleur émise par les déchets des systèmes de piles à combustible fixes peut également être utilisée pour le chauffage de l'air et de l'eau, ce qui augmente en conséquence l'efficacité de l'utilisation énergétique.

Les piles à combustible ne produisent quasiment aucune émission gazeuse. Lorsque leur combustible est l'hydrogène pur, les seuls produits dérivés sont la chaleur et la vapeur d'eau. En fait, les cosmonautes du *Space Shuttle* boivent même l'eau produite par les piles à combustible présentes à bord de la navette.¹⁴

LIRE LA SUITE PAGE 15
VOIR LA PAGE 16 POUR LES ANNOTATIONS

DES AVANCES RECENTES DANS LE DOMAINE DES PILES A COMBUSTIBLE

- L'entreprise *Ballard Power Systems de Burnaby*, en Colombie Britannique, au Canada, a développé des assemblages de piles à combustible qui produisent une puissance de 25 kilowatts (trois de ces assemblages suffiraient à alimenter une voiture) et fonctionnent à 85 degrés Celsius. Ballard a passé des accords d'investissements et de recherches avec de grands fabricants automobiles qui se montent à plus d'un milliard de dollars. Ballard travaille avec la filiale d'une entreprise d'électricité du New Jersey dans le but de commercialiser des unités fixes de cogénération à pile à combustible.
 - Le *California Fuell Cell Partnership* - une collaboration entre des fabricants automobiles, des compagnies pétrolières, une compagnie de fabrication de piles à combustible, et l'État de Californie - prévoit le lancement de 50 voitures et bus pour le transport de passagers entre les années 2000 et 2003. Le Partenariat projette également la construction de deux stations de distribution d'hydrogène en Californie.
 - Le gouvernement américain possède et exploite 30 unités de cogénération à piles à combustible, soit la gamme la plus importante au monde de piles à combustible. Des cinq ministères (départements-ministères américains) qui investissent plus de 700 millions de francs par an pour la recherche et les programmes de démonstration de piles à combustible, le ministère de l'Énergie américain dépense la somme la plus importante, soit environ 560 millions de francs. Les gouvernements canadiens, japonais et allemands encouragent actuellement le développement des piles à combustible par des crédits d'impôts, des prêts à taux d'intérêts réduits et des subventions.
 - La firme Daimler-Chrysler (anciennement Daimler-Benz) a fait passer des essais sur route à son véhicule à pile à combustible, la NECAR (*New Electric Car* - nouvelle voiture électrique) depuis 1993. En utilisant des combustibles divers, l'entreprise a déjà dévoilé quatre générations de véhicules, le dernier en date étant un véhicule de transport de personnes utilisant de l'hydrogène comme combustible, basé sur la voiture de la catégorie A de la firme.
 - Les villes de Chicago, Vancouver et Oslo mènent actuellement des essais sur le terrain pour des bus de transport en commun alimentés par piles à combustible. Des taxis alimentés par piles à combustible alcalines sont aussi testés dans les rues de Londres.
 - Les *Space Shuttles* (navettes) de la NASA utilisent des piles à combustible alcalines pour la production d'une puissance d'environ 45 kilowatts. Ces piles spécifiques sont très coûteuses.
 - Un distributeur automatique, alimenté par une pile à combustible, a été développé par Toshiba. Il marche avec du gaz liquifié provenant du raffinage du pétrole.
 - Les chercheurs de la *Northwestern University* dans l'Illinois ont développé une pile à combustible expérimentale qui marche directement au gaz naturel.
 - Des scientifiques de l'Université de Kogakuin à Tokyo ont développé un combustible liquide, qui serait composé de métaux et d'hydrogène, qui pourrait fournir l'hydrogène aux piles à combustible sans utiliser un reformeur de combustible.
 - Deux entreprises, *FuelCell Energy* (anciennement *Energy Research Corporation*) et *Bath Iron Works*, ont formé un partenariat pour le développement d'une centrale électrique à piles à combustible pour des applications de défense maritime.
- Sources:** le site web de *Fuel Cells 2000*, <http://www.fuelcells.org>, consulté le 15 septembre 1999; le site web de *California Fuel Cell Partnership*, <http://www.drivingthefuture.org>, consulté le 15 septembre 1999, le communiqué de presse de *Fuel Cells 2000*, du 17 mars 1999; *Fuel Cell Technology Update*, *Fuel Cell 2000*, septembre 1999, <http://www.fuelcells.org>; Robert F. Service, "Bringing Fuel Cells Down to Earth", *Science*, vol. 285, N° 5427, le 30 juillet 1999, p. 684.

LES PILES À COMBUSTIBLE SUITE DE LA PAGE 14

Les autres émissions dépendent de la source de l'approvisionnement en hydrogène. L'utilisation de méthanol aboutit à des émissions zéro d'oxydes d'azotes et de monoxyde de carbone, et à de très légères émissions d'hydrocarbures. Les émissions augmentent si l'on passe de l'hydrogène au méthanol puis à l'essence, mais même avec l'essence des émissions très faibles seraient obtenues.¹⁵ Dans tous les cas, le remplacement de nos moteurs à combustion interne actuels par des piles à combustible aboutirait à une réduction nette des émissions de CO₂ et d'oxydes d'azote. (Voir le tableau des émissions page 12).

Les piles à combustible offrent également une

flexibilité plus importante pour les infrastructures énergétiques, en créant des opportunités de distribution de la production (des ressources d'énergie décentralisées multiples permettant de réduire les pertes de transmission) et des marchés extérieurs au réseau (qui bénéficieraient particulièrement aux régions difficilement accessibles et rurales qui n'ont pas accès aux lignes électriques). Les piles à combustible permettraient une production privée de l'essentiel de l'énergie nécessaire aux résidences individuelles et aux quartiers, ce qui améliorerait significativement l'efficacité énergétique.

Les piles à combustible offrent une fiabilité accrue et une énergie de grande qualité. Elles sont durables, ne

LIRE LA SUITE PAGE 16
VOIR LA PAGE 16 POUR LES ANNOTATIONS

LES PILES À COMBUSTIBLE SUITE DE LA PAGE 15


nécessitent pas de manipulation, et produisent un flux d'énergie stable.

Pourtant, un développement plus poussé de la technologie des piles à combustible sera nécessaire afin d'en améliorer le rendement, d'en réduire les coûts, et par conséquent de rendre les piles à combustibles compétitives face aux autres technologies énergétiques. Il est à remarquer, en étudiant les coûts des technologies énergétiques, que des comparaisons devraient être basées sur tous les aspects du rendement de la technologie, y compris les coûts d'investissement et de fonctionnement, les émissions de produits polluants, la qualité de l'énergie produite, la durabilité, le démantèlement et la flexibilité.

Bien que l'hydrogène sous forme gazeuse soit le meilleur combustible, la base en termes d'infrastructures ou de véhicules nécessaires n'existe pas encore. Les systèmes de distribution des combustibles fossiles (stations d'essence, etc..) pourraient être utilisés dans un avenir proche pour distribuer une source d'hydrogène sous forme d'essence, de méthanol ou de gaz naturel. Cela éliminerait le besoin de stations spéciales de chargement d'hydrogène, mais cela nécessiterait que les véhicules aient à bord un reformeur pour convertir les combustibles fossiles en hydrogène. L'inconvénient de cette approche est qu'elle requiert l'utilisation de combustibles fossiles, et ainsi qu'elle aboutit à des émissions de dioxyde de carbone. Le méthanol, qui est actuellement le produit concurrent le plus utilisé, engendre moins d'émissions que l'essence, mais il nécessiterait la présence de réservoirs plus grands à bord, car il a un volume deux fois plus important pour le même contenu énergétique.¹⁶

Contrairement aux systèmes de distribution des combustibles fossiles, les systèmes électriques solaires et éoliens, (qui utilisent de l'électricité pour créer de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de l'eau), et les systèmes de photo-conversion directe (qui utilisent des matières semi-conductrices ou des enzymes pour produire de l'hydrogène), pourraient fournir une source d'hydrogène sans nécessiter une étape de 'reformage', par conséquent sans les émissions engendrées par les piles à combustible au méthanol ou à l'essence. L'hydrogène

pourrait être stocké et reconverti, au moment voulu, en électricité à l'intérieur d'une pile à combustible. A long terme, le couplage de piles à combustible avec de telles sources d'énergie renouvelables pourrait bien s'avérer être une stratégie efficace pour fournir une source d'énergie à la fois rentable, écologique et multi-usages.

L'IEER émet les recommandations suivantes : les autorités locales, nationales et fédérales devraient accorder une partie de leurs budgets d'acquisition en véhicules à ceux fonctionnant avec des piles à combustible, et aux systèmes de piles à combustible fixes afin de fournir l'électricité et la chaleur à certains de leurs bâtiments, nouveaux ou existants. Cela encouragera le développement d'une technologie vitale, et réduira les émissions de gaz à effet de serre. 

¹ Voir le site web du *Schatz Energy Research Centre*, à l'Université *Humboldt State*, <http://www.humboldt.edu/~serc/faq.html> - consulté le 1er octobre 1999.

² Une pile à combustible à l'état expérimental qui fonctionne directement au gaz naturel a récemment été développée par une équipe de chercheurs à l'Université Northwestern, près de Chicago, en Illinois (Source : *Fuel Cell Technology Update, Fuel Cells 2000*, septembre 1999, <http://www.fuelcells.org>).

³ Voir le site web de *Ballard Power Systems*, <http://www.ballard.com/faq.asp>, consulté le 17 septembre 1999.

⁴ *Compact Fuel Processors for Automotive Fuel Cells*, Laboratoire National Pacific Northwest du ministère de l'Énergie des États-Unis, le 1er avril 1999. <http://www.pnl.gov/microcats/fullmenu/compfuelproc.html>, consulté le 13 octobre 1999.

⁵ *Fuel Cell Technology Update, Fuel Cells 2000*, septembre 1999, <http://www.fuelcells.org>.

⁶ Source : le site web de *Ballard Power Systems*, consulté le 17 septembre 1999.

⁷ Matthew L. Wald, "Energy to Count On", *New York Times*, 17 août 1999, p. C1, C7.

⁸ Site web de *Ballard Power Systems*, consulté le 17 septembre 1999.

⁹ Site web de *Fuel Cells 2000*, <http://www.fuelcells.org>, consulté le 15 septembre 1999.

¹⁰ Wald, 1999.

¹¹ *Fuel Cells Technology Update*, septembre 1999.

¹² Wald, 1999; *Fuel Cells Technology Update*, septembre 1999.

¹³ Site web du *Schatz Energy Center*, consulté le 1er octobre 1999.

¹⁴ Joe Schwarcz, "Hydrogen, the First Element : What a Blast!", *Washington Post*, le 8 septembre 1999, page H1, H6.

¹⁵ Site web de *California Fuel Cell Partnership*, <http://www.drivingthefuture.org>, consulté le 15 septembre 1999; Robert F. Service, "Bringing Fuel Cells Down to Earth", *Science*, Vol. 285, n° 5427, le 30 juillet 1999, p. 684.

¹⁶ Robert F. Service, 1999, p. 684.

CORRECTION

Dans *Wind Power Versus Plutonium: An Examination of Wind Energy Potential and a Comparison of Offshore Wind Energy to Plutonium Use in Japan* (IEER, janvier 1999), il y a une erreur dans le tableau 22 de la page 47. Les coûts respectifs du combustible et du retraitement devraient être de 0,9 et 1 cent par kilowattheure. En conséquence, l'estimation du coût de l'électricité produite par un surgénérateur devrait être de 11,3 cents du kilowattheure et non de 11 cents. En outre, le coût total de l'éolien offshore devrait être de 5,54 kilowattheure. (Ce chiffre est donné à deux décimales près parce que le coût du démantèlement, qui y est inclus est exprimé de cette façon.) Le tableau de la page 7 reflète ces corrections (Pour une liste des errata dans les publications de l'IEER, visitez notre site web à <http://www.iewer.org>)



C h e r A r j u n

Cher Arjun,

Qu'est-ce que le LNTH, et qu'est-ce que cela peut m'apporter?

— Mr Lébahi, de Buffalo.

Cher Monsieur Lébahi,

Dans l'établissement nucléaire, LNTH signifie *Linear No-Threshold Hypothesis* (hypothèse linéaire sans seuil). C'est une hypothèse qui est utilisée dans la pratique réglementaire pour évaluer le risque cancérigène des faibles niveaux de rayonnements ionisants. Ces faibles niveaux de rayonnements sont définis comme étant un niveau de dose d'irradiation qui ne produit pas d'effets observables à court terme tels que des affections cutanées, des vomissements, ou un nombre élevé de globules blancs. De tels effets observables (ou somatiques) sont produits lorsque une dose importante de radiation est reçue en un court temps. La plupart des effets somatiques se produisent avec des doses de 100 rem ou davantage, bien que le nombre de globules blancs se modifie déjà à des doses bien plus faibles. Une même dose reçue sur une durée de plusieurs semaines ou plusieurs mois ne produirait pas facilement d'effets observables, sauf au niveau cellulaire. Pourtant, cela pourrait augmenter les risques de maladies (effets stochastiques), parmi lesquels la maladie la plus étudiée est le cancer.¹

Les survivants des bombardements nucléaires d'Hiroshima et Nagasaki ont été étudiés de façon intensive dans le but d'évaluer les risques de cancers. Cela a demandé un effort considérable - plus de 75 000 personnes ont été étudiées pendant plus de 50 ans - et ces études sont toujours en cours. Les estimations de risques de cancers utilisées en pratique réglementaire sont pour l'essentiel basées sur l'étude de ces survivants. Pourtant, étant donné que les survivants ont reçu des doses assez importantes, et comme leur dose d'irradiation a été reçue sur un laps de temps très court, l'extrapolation de ces risques pour les niveaux de faibles doses reçues sur de plus longues périodes de temps s'est avérée à la fois controversée et difficile. De surcroît, certains chercheurs, notamment Alice Stewart, physicienne britannique, et ses collègues, ont fait remarquer que les survivants à long terme faisaient probablement partie de toute façon des personnes ayant une meilleure santé physique, et que cela compliquait les extrapolations sur les risques de cancers pour la population générale à partir du groupe de survivants.

Il y a d'autres catégories de populations exposées. D'abord, tout le monde est exposé aux rayonnements naturels de l'environnement. Il y a aussi des niveaux variables d'exposition au radon à l'intérieur de bâti-

ments. Ces niveaux dépendent de la construction de la maison et de la région dans laquelle elle est située. Ce qui rend les choses plus difficiles, c'est que tout le monde est également exposé à de nombreux autres facteurs de risques, y compris des risques naturels et des risques engendrés par l'homme, le régime alimentaire, et les facteurs héréditaires. Étant donné qu'il y a un taux important de cancers causés par tous ces autres facteurs, il est très difficile de parvenir à isoler les risques que l'on peut explicitement attribuer à l'exposition aux faibles doses de rayonnements créées par l'homme, tels que les retombées de la bombe nucléaire ou l'exposition aux rayonnements sur le lieu de travail.

Dans ce texte, nous définissons le risque de cancers (R) comme étant la valeur prévue du nombre de cas de cancer pour une dose d'irradiation donnée (D). Il est à remarquer que l'incidence de risque de cancer est d'environ 50% plus importante que le risque de cancer mortel. Les différentes hypothèses présentées dans cet article ne donnent pas de niveau de risque spécifique, elles traitent seulement de la forme de la courbe qui décrit le risque en fonction de la dose.² (Voir les équations dans les notes de bas de page). D'autres facteurs jouent un rôle dans la détermination du risque, entre autres l'âge et le sexe de la personne exposée. Les risques varient aussi selon le type de cancer. Plus précisément, les facteurs de risques pour la leucémie sont calculés séparément des risques pour les tumeurs solides, telles que le cancer du poumon et du sein.

L'hypothèse LNTH a été la méthode la plus répandue (tout en n'étant pas universellement acceptée) permettant d'extrapoler le risque d'expositions à des niveaux relativement élevés à des niveaux plus faibles. Cette hypothèse établit qu'une augmentation donnée de l'exposition aux rayonnements, quelle que soit son importance, produira une augmentation proportionnelle du risque de cancer. En conséquence, si une personne a un risque donné d'avoir un cancer avec une exposition d'un rem, son risque de cancer serait multiplié par deux pour une exposition de deux rem, et divisé par deux à 0,5 rem. De surcroît, si dix personnes recevaient collectivement un rem, leur risque collectif serait le même que celui d'une personne exposée à un rem.

L'exposition de populations collectives est exprimée en homme-rem, qui est la somme de toutes les expositions individuelles dans une population donnée. À partir de l'estimation d'une dose collective, on peut alors appliquer un facteur de risque constant pour obtenir une estimation statistique du nombre de cancers

LIRE LA SUITE PAGE 18
VOIR LA PAGE 19 POUR LES ANNOTATIONS

FACTEUR D'EFFICACITE DU DEBIT DE DOSE

Différents éléments provenant essentiellement d'expérimentations sur les animaux indiquent que de faibles doses de rayonnements reçues à un faible débit produisent un risque inférieur à celui qui serait obtenu si la dose était reçue en une seule fois. Cette supposée 'efficacité inférieure' des faibles débits de dose est exprimée par un coefficient appelé Facteur d'Efficacité du Débit de Dose, ou DREF (*Dose Rate Effectiveness Factor*). Le risque corrigé par unité de dose pour les faibles débits de dose est obtenu en divisant le risque non corrigé par le DREF. Dans la pratique réglementaire courante, on estime que le risque provenant de faibles débits de dose est environ inférieur d'un facteur 2 au risque non corrigé. Sur cette base, l'Agence pour la protection de l'environnement (EPA) des Etats-Unis applique un DREF de 2 au coefficient non corrigé de risque de cancer défini par le BEIR V à un niveau de 0,08 cancer mortel par homme-sievert, obtenant ainsi un coefficient de risque corrigé de 0,04 cancer mortel par homme-sievert. Ce dernier chiffre est le facteur de risque utilisé dans la réglementation actuelle sur la radioprotection aux Etats-Unis. (1 sievert = 100 rem)

CHER ARJUN SUITE DE LA PAGE 17

supplémentaires qui résulteraient de cette exposition. Dans la pratique réglementaire américaine, il est courant de supposer que le risque de cancer mortel dans une population est chiffré à environ un cancer mortel en excès pour une exposition de 2500 homme-rem. La courbe n°1 présente l'hypothèse LNT.

D'autres hypothèses existent concernant la forme de la courbe dose-réaction. L'alternative la plus courante à celle du seuil est l'hypothèse "linéaire-quadratique". Selon celle-ci, il y a un terme de risque qui est directement proportionnel à la dose (le terme linéaire) et un autre terme de risque qui est proportionnel au carré de cette dose (le terme quadratique). La courbe n°2 illustre une relation quadratique du risque par rapport à la dose (où le terme linéaire est zéro).

Certains pensent qu'il doit y avoir un seuil en-dessous duquel il n'y a pas de risque de cancer. Selon eux, certaines matières toxiques présentent de tels seuils, et les rayonnements ont aussi le leur. De tels seuils peuvent provenir, par exemple, de la capacité du corps à réparer les dommages subis par des doses de rayonnement plus faibles. La courbe n°3 présente une hypothèse de seuil, avec une relation dose/effet linéaire pour des doses plus élevées qu'un seuil de T rems. Toutefois, il a été souligné que, étant donné que les êtres humains sont déjà exposés aux rayonnements naturels ainsi qu'à d'autres expositions naturelles et artificielles qui endommagent le système d'auto-réparation du corps humain, l'hypothèse linéaire sans seuil

LIRE LA SUITE PAGE 19
VOIR LA PAGE 19 POUR LES ANNOTATIONS

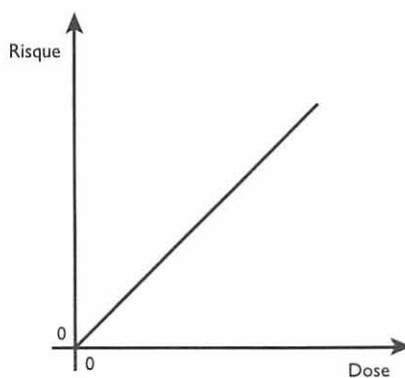


Figure 1: hypothèse linéaire sans seuil

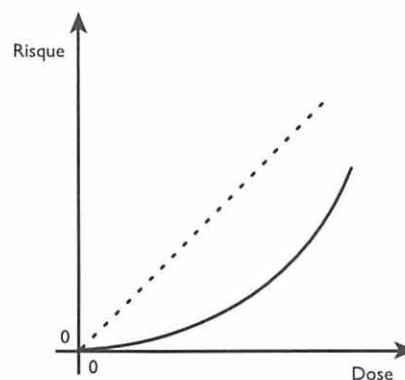


Figure 2: dépendance quadratique à la dose

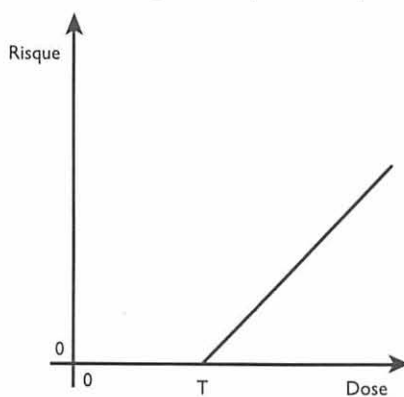


Figure 3: hypothèse de seuil

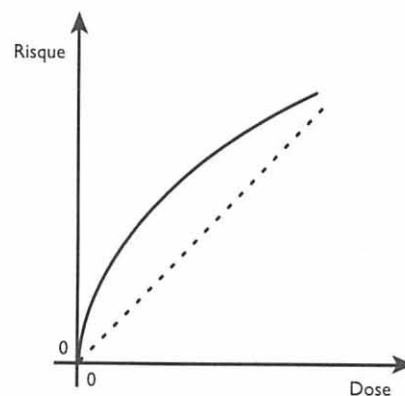


Figure 4: hypothèse supralinéaire

pourrait, en tout cas, s'appliquer aux doses d'irradiation imposées par les activités humaines parce que celles-ci correspondent à des augmentations par rapport aux autres expositions. Par conséquent, afin d'estimer les risques provenant des activités humaines, l'hypothèse LNT pourrait bien être encore valide et servir de base cohérente pour la protection de la santé publique.

Des expérimentations récentes apportent également des preuves quant au fait que les faibles doses peuvent produire un niveau de risque plus élevé par unité de dose.³ On connaît ce phénomène sous le nom d'hypothèse supra-linéaire, et celui-ci est décrit par la courbe n° 4.

Enfin, on trouve également l'hypothèse " hormesis ", selon laquelle une petite quantité de rayonnement peut produire des effets sanitaires bénéfiques, par exemple en stimulant le système immunitaire. Les éléments essentiels apportés à l'appui de cette hypothèse proviennent d'expérimentations menées sur des souris. Selon un résumé des preuves appuyant l'hypothèse hormesis, résumé compilé par Charles Waldren, une dose élevée d'irradiation avait, suivant les circonstances, produit moins de mutations quand elle était précédée par une dose située entre 1 et 20 rem. Cet effet supposé protecteur ne se produit pourtant pas à des doses plus faibles ou plus élevées, et ne dure qu'environ l'espace d'une journée, après laquelle il disparaît. Un tel effet hormesis, même s'il existe pour les êtres humains, n'a pas de signification pour la santé publique, particulièrement au vu des preuves d'autres risques à long terme produits par des doses de quelques rems.⁴

La grande majorité des travaux effectués sur les risques dus aux irradiations a été centrée sur les risques de cancer. Il existe un nombre d'autres risques potentiels (voir la lettre de la page 3). Il est possible que les risques non liés au cancer pourraient, au moins pour certaines personnes et en certaines circonstances, s'avérer plus graves que les risques de cancer.

Beaucoup de ceux qui ont mis en avant des arguments en faveur du seuil et des hypothèses hormesis ont également prôné des réglementations contre les rayonnements plus laxistes que celles appliquées actuellement.⁵ Cela serait tout à fait inacceptable, à divers titres. En premier lieu, on n'a encore que peu de certitudes quant aux effets sanitaires des faibles doses. En de telles circonstances, il paraîtrait plus cohérent que toute pratique liée à la santé publique se base plutôt sur un excès de rigueur que l'inverse. Ensuite, le risque causé par les rayonnements a, au fur et à mesure des décennies, continuellement été révisé à la hausse. Même s'il n'est pas certain que cela se poursuive de façon indéfinie, cette raison est néanmoins suffisante pour ne pas relâcher les normes ou pour ne pas écarter l'hypothèse LNT. Troisièmement, il a été montré que la réaction aux rayonnements est largement différente selon l'individu concerné. Des normes devraient être

mises en place qui permettent de protéger les populations les plus vulnérables. Quatrièmement, même s'il y a un seuil, il est important de se rappeler que les réglementations concernent les ajouts par rapport aux rayonnements. L'hypothèse linéaire sans seuil serait tout de même appropriée pour évaluer le risque de cancer - c'est-à-dire le risque imposé par des doses d'irradiation *additionnelles*. Cinquièmement, il y a de nombreux autres effets que le cancer et des effets synergétiques qui ne font pas encore l'objet de recherches approfondies, certaines ne font d'ailleurs l'objet d'aucune recherche pour le moment. Enfin, certains des groupes potentiellement les plus affectés font partie des groupes les plus vulnérables aux effets néfastes des expositions (voir la lettre page 3). Des réglementations très strictes, basées sur une hypothèse linéaire sans seuil, confèrent un minimum de protection pour les risques autres que le cancer et pour les groupes vulnérables, ceci dans l'attente de recherches sur ces effets.

Il existe donc de bonnes raisons pour que l'on continue d'utiliser l'hypothèse linéaire sans seuil à des fins de réglementation. Il sera alors assez tôt pour envisager une révision des normes lorsque les problèmes tels que ceux que nous avons évoqués auront été résolus.



¹ Les faibles niveaux de rayonnements émis par les particules alpha sont appelés " rayonnement à transfert linéique d'énergie élevé " (rayonnement à TLE élevé). Les effets par unité de dose sont plus graves que ceux produits par les rayons gamma et les rayonnements beta (qui correspondent à des rayonnements à " faible TLE "). L'addition des effets de ces deux différents types de rayonnements pose un problème scientifique épineux, que nous n'adressons pas dans cet article concis.

² Les différentes hypothèses en termes de risque de cancer peuvent être exprimées de façon mathématique comme suit :

LNTH : $R=k*D$, R correspondant au risque de cancer, k à une constante proportionnelle, et D à la dose d'irradiation en rem

Risque linéaire avec une dose seuil T: $R=0$ pour $D<T$ et $R=k*(D-T)$ pour $D>T$.

Le modèle linéaire quadratique (sans seuil) : $R= k_1D + k_2D^2$, k_1 et k_2 correspondant respectivement aux coefficients de risques linéaire et quadratique.

hypothèse supra-linéaire (sans seuil): $R=k*D^n$, avec $0<n<1$.

Les formes de la courbe sont déterminées par ces équations générales. Les valeurs des risques encourus à différentes doses dépendent des valeurs des paramètres k, T et n (selon les cas). Pour plus de renseignements concernant le LNTH et les modèles linéaires quadratiques, voir *Committee on Biological Effects of Ionizing Radiation, Health Effects of Exposure to Low-levels of Ionizing Radiation (BEIR V), National Research Council, Washington DC, 1990, chapitre 4.*

³ Brenner, D., " Did Radiobiology Play a Useful Role in the Recent BEIR VI Report ? ", abrégé paru dans *Radiation Research*, vol. 161, janvier 1999, p 95-96.

⁴ Waldren, C., " Adaptive Response, Genomic Instability, and Bystander Effects ", discours prononcé lors de la réunion de la Commission BEIR VII à l'Académie nationale des sciences des Etats-Unis, Washington, D.C, le 3 septembre 1999.

⁵ Jaworowski, A., " Radiation Risks and Ethics ", *Physics Today*, vol 52, n° 9, septembre 1999, p 24-29. Jaworowski propose une multiplication par dix de la dose de rayonnement autorisée (de 100 millirems à 1 rem par an) avant " qu'il ne soit nécessaire de faire intervenir les autorités de protection contre les rayonnements ionisants " (p. 29).



L'énigme atomique



Gamma, le chien du Dr. Egghead, vient d'apprendre de nouvelles équations permettant de calculer le risque de cancer provenant de l'exposition à des rayonnements ionisants. Comme ses pattes sont trop grosses pour utiliser une calculatrice, il a besoin de vous pour l'aider à résoudre quelques exemples de calcul. Gamma a décidé d'utiliser l'hypothèse linéaire sans seuil dans tous ses calculs.

Doses pour les populations

Rappelez vous qu'une dose pour la population est la somme des doses reçues par tous les individus composant cette population. La dose pour une population est parfois appelée dose " collective ", et on la mesure en utilisant les unités d'homme-rem ou d'homme-sievert.

- 1) La population d'une grande ville de 100 000 habitants est exposée à une dose d'un rem par personne. Quelle est la dose pour la population ?
- 2) La population d'une ville importante d'un million d'habitants est exposée à une dose d'un rem par personne. Quelle est la dose collective ?
- 3) a) La dose collective reçue par les habitants d'une ville de 10 000 habitants était de 100 000 homme-rem. Quelle est la dose moyenne par personne ?
b) Certaines habitants de la ville ont-ils pu recevoir une dose plus ou moins importante que la dose moyenne ?

CONVERSIONS

1 rem = 0,01 sieverts (Sv)
person-sievert = (population size) × (dose (Sv) per person)

Risques de cancer engendrés par les doses :

Rappelez vous qu'un homme-sievert signifie que plus d'une personne a été touchée. Si 0,05 sievert étaient reçus par une population de 100 personnes, alors la dose pour la population serait de 5 homme-sieverts.

- 4) Le BEIR V donne un risque de 0,08 cancers mortels par homme-sievert dans le cas d'une dose reçue d'un seul coup.
 - a) Quel terme est utilisé pour décrire le chiffre 0,08 ?
 - b) Combien d'homme-sieverts seraient nécessaires pour engendrer un cancer mortel dans une population ?
 - c) Si l'on a une population de 100 000 habitants et que le nombre de cancers mortels causés par les radiations engendrées par l'homme est estimé à 20, quelle est donc la dose moyenne par personne ?
 - d) Si l'on a une population de 100 000 et qu'elle est exposée à 0,1 Sv par personne, quelle est l'estimation du nombre de cancers mortels ? (La limite de dose annuelle pour le grand public concernant les rayonnements non-médicaux est de 0,0001Sv).
- 5) Si l'on suppose le facteur d'efficacité du débit de dose (DREF, voir le tableau de la page 18) des faibles doses à 0,08 cancers mortels/homme-Sv, quel est le risque *ajusté* ?

La solution de l'énigme atomique sera donnée dans un numéro futur. Le numéro suivant (E&S #12), déjà paru, ne contient pas la solution.

The Institute for Energy and Environmental Research

6935 Laurel Avenue, Takoma Park, MD 20912,
USA

Phone: (301) 270-5500

FAX: (301) 270-3029

Adresse Internet: ieer@ieer.org

Page Web: <http://www.ieer.org>

