



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 335 (2003) 603–610



Géophysique externe, climat et environnement (Climat)

L'énergie nucléaire : obstacles et promesses

Pierre Bacher

19, rue du Maréchal-de-Lattre-de-Tassigny, 21470 Brazey-en Plaine, France

Reçu le 23 septembre 2002 ; accepté le 10 mars 2003

Rédigé à l'invitation du Comité éditorial

Résumé

L'énergie nucléaire dispose d'atouts certains (durabilité des ressources, économie, absence d'émission de CO₂), mais se heurte à des obstacles sérieux (crainte des accidents, peur de la radioactivité, gestion des déchets). La grande taille des centrales actuelles restreint son usage aux grands réseaux et nécessite une mise de fond initiale importante. Compte tenu de ces différents facteurs, on examine quelle peut être la contribution de l'énergie nucléaire à la lutte contre l'effet de serre, ainsi que ses voies de développement les plus prometteuses. *Pour citer cet article : P. Bacher, C. R. Geoscience 335 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Nuclear energy: obstacles and promises. Nuclear energy has distinctive merits (sustainable resources, low costs, no greenhouse gases) but its development must overcome serious hurdles (fear of accidents, radiophobia, waste management). The large unit size of present-day reactors is compatible only with large electrical grids, and involves a high capital cost. Taking into account these different factors, the paper outlines how nuclear energy may contribute to the reduction of greenhouse gases, and which are the most promising developments. *To cite this article: P. Bacher, C. R. Geoscience 335 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : énergie nucléaire ; radioactivité ; déchets nucléaires ; sûreté nucléaire ; économie ; effet de serre

Keywords: nuclear energy; radioactivity; nuclear waste; nuclear safety; economics; greenhouse effect

Abridged English version

1. Introduction

Most scenarios look forward to an energy demand in 2050 ranging from 15 to 20 Gtep, compared to 9 Gtep in 2000. Without constraints such as climate

change and economics, this increase in demand could easily be met with fossil fuels and, to a lesser extent, renewable energies [2]. Taking into account these constraints, however, nuclear energy will be difficult to ignore, and could contribute 3 to 5 Gtep, compared to 0.6 Gtep today. Such a development, however, will take place only if the obstacles – many of them sociological – that hinder nuclear energy are overcome. It will also involve new technological developments.

Adresse e-mail : pierre.bacher@wanadoo.fr (P. Bacher).

2. The obstacles

Technical issues and sociological behaviours are closely intertwined in the obstacles that nuclear energy must overcome. Neither a purely technical, nor a purely sociological approach will resolve the issues such as nuclear safety, radiophobia or nuclear waste management.

3. Nuclear safety

On a technical ground, the accidents at Three Mile Island and Chernobyl have clearly shown where lay the boundary between safe and unsafe plants. TMI was on the safe side and, in addition, brought a host of lessons that have further improved the safety of present plants. Chernobyl confirmed, a contrario, that the Western safety principles were sound. Both accidents demonstrated the need for a profound safety culture.

Sociologically, the fact that even the opponents to nuclear energy accept to live for decades with the existing plants seems to be evidence that they accept the idea that these plants are safe.

4. Radiophobia

Radioactivity is a deeply rooted fear. Even so for man-made doses much lower than natural doses, or even than spatial differences in natural doses. This is clearly a sociological problem, which concerns as much the medical as the energy field, and will require a major educational effort. Teaching all students how to measure radioactivity in their day-to-day environment would be a first step in the right direction. Learning how to balance the risks against the benefits of human activities is also a field to investigate. Again, this does not concern only nuclear energy.

5. Long-lived nuclear wastes

The nuclear wastes have three main characteristics:

- for the first two to three centuries, most of the radioactivity and of the heat release are due to the fission products and a few actinides;
- in the very long term (beyond 200 000 years), most of the radiotoxic inventory is due to one or two minor actinides (^{237}Np , ^{242}Pu);
- in between, both the radioactivity and the radiotoxic inventory are determined by the quantities of actinides present, which depend mainly on the quantity of plutonium present, hence on whether the fuel is reprocessed or not.

The containment of the radioactive isotopes is achieved with at least four barriers, in a defence in-depth approach: a matrix (the spent fuel or a glass matrix for the wastes from reprocessing), a container, a near-field man-made barrier, and the geological barrier. The first two barriers guarantee the containment during the first period, and the geological barrier is assumed to be the only one in the very long term. The safety analyses carried out with computational models show that the release of radioactive species in the biosphere should lead in all cases to a small fraction of the natural radioactivity. Geological laboratories should help confirm the hypotheses put into the models.

Nuclear wastes' management has become a major sociological issue, both because they are 'wastes' and they are 'nuclear'. However, the case is not hopeless. In Sweden and Finland, after a major effort at dialogue with the locals that has been going on for more than ten years, final repositories have been accepted by the population. In the United States, the Congress has approved the waste disposal site at Yucca Mountain.

6. New developments

A sustainable development of nuclear energy will sooner or later need to 'burn' ^{238}U , which represents more than 99% of uranium resources. Fast-neutron reactors will be necessary for that. Nuclear energy could also have other uses than electricity generation, such as desalinisation of water and high-temperature processes for the generation of hydrogen. High-temperature reactors are the most likely candidates for the latter.

7. Conclusion

Nuclear energy should probably be developed during the next few decades, if only for economic reasons.

But this will only be possible if the sociological obstacles are overcome. This will require, among others, a better understanding of the risks and of the benefits of each energy. In the longer term, new nuclear systems will be needed, as a supplement to the present technologies.

1. Introduction

L'énergie nucléaire dispose d'un certain nombre d'atouts, mais rencontre également des obstacles, matériels ou psychologiques. Parmi les atouts, il faut citer la durabilité des ressources, un avantage économique, au moins à long terme, par rapport à toutes les énergies fossiles, et l'absence de gaz à effet de serre. Les obstacles sont liés à la radioactivité, qui engendre de fortes résistances, et aux questions soulevées par la gestion de la fin de cycle. La forte puissance unitaire des réacteurs nucléaires actuels permet d'obtenir des coûts du kWh compétitifs avec les meilleures énergies fossiles, mais présente le double inconvénient de nécessiter une mise de fonds initiale très élevée (typiquement de l'ordre de 2 milliards d'euros) et de ne permettre leur installation que dans les régions disposant de grands réseaux de transport d'électricité.

Compte tenu de ces différents éléments, l'énergie nucléaire doit-elle et peut-elle contribuer à lutter contre l'effet de serre ? Et quel sera le nucléaire du futur ?

S'il est relativement aisé de répondre à ces questions pour les 20 à 30 ans à venir, l'évolution au-delà de 2020–2030 dépendra de très nombreux facteurs, en particulier des besoins en énergie et de la manière dont seront surmontés les obstacles au nucléaire et appréciés ses atouts. L'évolution dépendra également, mais à plus long terme, des efforts de développement de nouvelles filières nucléaires et des conditions politiques et administratives encadrant les différentes énergies.

2. Le contexte énergétique et environnemental

La plupart des scénarios font apparaître des besoins en énergie en 2050 compris entre 15 et 20 Gtep, comparés à 9 Gtep en 2000. S'il n'y avait ni contraintes

« effet de serre », ni contraintes économiques, ces besoins pourraient être largement satisfaits avec les combustibles fossiles, et, en plus faible partie, avec les énergies renouvelables [2]. La contrainte imposée par le risque de l'« effet de serre » est forte, et imposerait de réduire de 6 (valeur actuelle) à 4 Gt_C les émissions de CO₂. La contrainte économique l'est également, le caractère dispersé, et souvent aléatoire, de la plupart des énergies renouvelables conduisant à des coûts élevés de l'énergie. Avec de telles contraintes pesant sur les énergies alternatives, l'énergie nucléaire est pratiquement incontournable, à hauteur de 3 à 5 Gtep (0,6 en 2000). Un tel développement du nucléaire n'est pensable que si les obstacles qui le freinent aujourd'hui sont surmontés et ses avantages mieux perçus. Il implique également que soient préparées de nouvelles voies techniques.

3. Surmonter les obstacles

Les obstacles sont moins techniques que sociologiques ; il n'est cependant pas inutile, avant de rechercher les moyens de les surmonter, de mettre en perspective les données techniques. Nous le ferons dans trois domaines : la crainte des accidents, la crainte de la radioactivité et les déchets nucléaires.

3.1. La crainte des accidents : la sûreté nucléaire

Deux graves accidents ont marqué l'histoire du nucléaire civil : la fusion du cœur du réacteur de Three Mile Island (États-Unis, 1979) et l'explosion du réacteur de Tchernobyl (URSS, 1986). Le premier n'a eu aucune conséquence, ni à l'extérieur de la centrale, ni pour le personnel. Le second a fortement contaminé les régions environnantes, continue à avoir des effets sanitaires 16 ans plus tard, et a eu des effets mesurables dans toute l'Europe.

Sur le plan strictement technique, ces deux accidents ont balisé le terrain. Celui de TMI a montré que les principes de sûreté étaient bons, tout en mettant en évidence un certain nombre d'insuffisances dans leur mise en œuvre. Celui de Tchernobyl a confirmé que le non-respect de quelques principes de base, tant au niveau de la conception des installations qu'à celui de leur exploitation, pouvait avoir des conséquences dramatiques.

Depuis ces accidents, les concepts de défense en profondeur et de culture de sûreté ont été explicités et sont devenus universels, et, parallèlement, les outils d'évaluation et de démonstration de la sûreté ont été largement développés [1]. Le bilan d'exploitation des ouvrages nucléaires au cours des 15 dernières années est devenu exemplaire, des événements anormaux n'atteignant que très exceptionnellement le niveau 3 sur une échelle de gravité qui en comporte 7 (l'accident de Three Mile Island étant classé au niveau 5 – aucun rejet significatif de radioactivité à l'extérieur de l'enceinte de confinement – et celui de Tchernobyl au niveau 7). La transparence de l'information est devenue la règle.

Socialement, tous ces efforts ont porté leurs fruits. La confiance dans les exploitants et la crédibilité des autorités de contrôle ont fortement progressé. Le fait que même les opposants au nucléaire semblent accepter que la « sortie » du nucléaire soit étalée sur 20 ans montre qu'ils ne considèrent pas comme immédiat ou majeur le risque d'accident.

La crainte des accidents ne semble donc pas être un réel obstacle à la poursuite du nucléaire. Mais on notera que le niveau actuel de sûreté des installations nucléaires, très élevé par rapport à la plupart des autres industries à risque, devra être maintenu, et démontré pour tout projet nouveau ne bénéficiant pas de tout le retour d'expérience acquis sur les modèles actuels de réacteurs. Il y a là une difficulté à ne pas sous-estimer.

3.2. La « radiophobie »

La crainte de la radioactivité est solidement ancrée, même s'agissant de faibles doses de radioactivité anthropogène, largement inférieures aux variations, dans le temps et dans l'espace, de la radioactivité naturelle. Le Becquerel, tout comme le Sievert, reste mystérieux et, comme tout ce qui est mystérieux, fait peur. Les ordres de grandeur des risques entraînés par une exposition à la radioactivité ne sont absolument pas perçus. Un effort spécifique de pédagogie est nécessaire dans ces deux domaines.

Ce que l'on mesure, perd de son mystère. Tous les élèves des collèges et des lycées devraient avoir l'occasion de mesurer la radioactivité naturelle, et tout particulièrement chez eux pour que les familles se familiarisent aussi avec le Becquerel. Des expériences

du type « main à la pâte » ont été conduites avec succès ici ou là, mais il faut maintenant les généraliser.

Apprendre à gérer les risques devient une nécessité – pas spécifiquement nucléaire – dans une société qui veut à la fois bénéficier des derniers progrès scientifiques et techniques, mais refuse de plus en plus les risques. Or, tout développement nouveau comporte des incertitudes, des avantages et des inconvénients. Une pédagogie du risque, qui passe par une juste appréciation des ordres de grandeur des uns et des autres, devrait faire partie du cursus scolaire et universitaire de tout citoyen.

Ces efforts de pédagogie et d'éducation sont d'autant plus importants qu'ils concernent tous les domaines d'application de la radioactivité, et en particulier le domaine médical.

3.3. Déchets à vie longue

Les déchets nucléaires ont une durée de vie très longue, pendant laquelle leurs caractéristiques évoluent, du fait même de leur radioactivité. On peut distinguer trois périodes :

- pendant 2 à 3 siècles, la radioactivité due aux produits de fission et à quelques actinides est très élevée et s'accompagne d'un dégagement de chaleur important ; celui-ci conditionne la durée de l'entreposage des déchets pour refroidissement, ainsi que les caractéristiques du stockage définitif ; celui-ci doit être capable d'évacuer la chaleur dégagée dans des conditions de température acceptables pour les déchets ;
- à très long terme (au-delà de 2 à 300 000 ans), seuls subsistent des isotopes de l'uranium, du ^{237}Np et du ^{242}Pu (Tableau 1), ainsi que quelques produits de fission à vie très longue et, de ce fait, très faiblement radioactifs ;

Tableau 1
Composition à long terme du combustible usé

Table 1
Long-term contents of spent fuel
^{235}U final \sim ^{235}U initial + ^{239}Pu initial
^{236}U final \sim ^{236}U initial + ^{240}Pu initial
^{237}Np final \sim ^{237}Np initial + (^{241}Pu et ^{241}Am initiaux)
^{238}U final \sim ^{238}U initial + fraction disparue de ^{242}Pu
^{242}Pu final déduit de ^{242}Pu initial par décroissance directe

- entre les deux, la radioactivité et l'inventaire de radiotoxicité sont dominées par les actinides présents dans les déchets.

Pendant les deux premières périodes, le confinement des déchets est assuré par leur conditionnement et par une barrière ouvragée. On admet généralement que cette protection rapprochée finira par perdre son efficacité et que la barrière géologique entre le stockage et la biosphère, en retardant, voire en bloquant, la migration des produits radioactifs, limitera les quantités de produits susceptibles de se retrouver dans la biosphère. La plupart des scénarios étudiés montrent que les actinides, très peu mobiles, interviennent très tardivement, et à un faible niveau, dans les doses susceptibles d'atteindre des populations.

On notera cependant que le plutonium est au cœur de la politique de gestion des déchets. S'il leur est incorporé, le plutonium (et ses descendants) contribuent fortement au dégagement de chaleur pendant la première période (^{238}Pu et ^{241}Am) et aux quantités d'actinides pendant les périodes suivantes. A très long terme, compte tenu des très faibles radioactivité et radiotoxicité des isotopes de l'uranium, seuls interviennent ^{237}Np et ^{242}Pu (en l'absence de retraitement) et ^{237}Np (3 à 4 fois moins), lorsque le plutonium et l'américium ont été extraits par le retraitement.

Les solutions techniques existent donc, qui permettent de limiter à des valeurs très faibles la radioactivité rejetée dans la biosphère, même si la plupart d'entre elles nécessitent encore des travaux de recherche et de développement pour assurer leur démonstration et leur optimisation. Socialement, le stockage des déchets nucléaires demeure difficile, car les deux mots « déchets » et « nucléaire » font peur.

Pourtant, la situation évolue dans ce domaine également. La Suède et la Finlande voient aboutir les efforts de dialogue citoyen qui auront duré près de 10 ans, et plusieurs sites possibles ont été retenus dans chacun de ces pays, avec l'accord des populations locales et des responsables politiques. Aux États-Unis, le Congrès a approuvé, à une large majorité, le site de Yucca Mountain, qui doit recevoir l'ensemble des déchets à vie longue américains. En France, la loi de 1991 fournit un cadre politique et scientifique à des décisions qui devront être prises dans tous les cas de figure.

4. Percevoir les avantages

4.1. Risques et environnement

Les questions de sécurité industrielle et de déchets, présentées ci-dessus comme des obstacles au développement du nucléaire, pourraient tôt ou tard être perçues comme des avantages marqués. À la suite de la catastrophe de l'usine AZF de Toulouse, par exemple, l'industrie nucléaire a souvent été citée en exemple. Et l'industrie nucléaire est une des seules industries à maîtriser l'ensemble de ses déchets.

Enfin, l'énergie nucléaire est une énergie particulièrement propre, maîtrisant remarquablement ses rejets radioactifs liquides et gazeux, et ne rejetant pratiquement aucun gaz à effet de serre ou polluant atmosphérique chimique.

4.2. Économie

C'est une énergie économique pour la production d'électricité en base, comparable au grand hydraulique et au gaz naturel à son prix actuel, et nettement moins chère que le charbon et que les énergies renouvelables (Tableau 2).

Face au problème du CO_2 , que le présent colloque confirme comme difficile à éluder, et qui se traduira à plus ou moins long terme par l'introduction d'un « coût du CO_2 », l'énergie nucléaire dispose d'un avantage économique considérable.

Limitée cependant à la production d'électricité en base dans des réseaux électriques de forte capacité, l'énergie nucléaire pourrait difficilement dépasser 10 à 15% de l'énergie primaire consommée dans le monde, soit au mieux 1,5 à 3 Gtep (contre un peu moins de 0,6 aujourd'hui) dans l'hypothèse d'une demande mondiale comprise entre 15 et 20 Gtep.

Tableau 2
Coûts du kWh – nucléaire, cycle combiné à gaz, éolien (centimes d'euro par kWh)

REP (en base)	~ 3
Cycle combiné gaz	~ 3
(+ « coût externe » CO_2)	(+1 à 2,5)
Éolien	5 à 6

4.3. Ressources

L'énergie nucléaire dispose de ressources considérables et bien réparties, qui permettent d'assurer un développement durable. Les ressources accessibles à un coût inférieur à 130 € par kg U sont évaluées à 4 Mt, permettant de produire 40 à 50 Gtep avec les réacteurs actuels (selon que l'on y recycle ou non le plutonium) (Tableau 3). Mais la part de l'uranium dans le coût du kWh étant faible (< 5%), on peut accéder à des ressources plus chères, et multiplier par 3 ou 4 les ressources, donc l'énergie produite, sans trop grever les coûts.

Tableau 3
Ressources en uranium et en thorium*

Ressources assurées et estimées U (à moins de 130 \$/kgU)	4 Mt
Équivalent énergie dans REP	40 à 50 Gtep
Équivalent énergie dans RNR	2000 Gtep
Ressources ultimes U (hors océans)	17 Mt
Ressources Th > ressources U	

* Ressources assurées et estimées gaz : 250 à 350 Gtep.

La technologie des neutrons rapides permet de multiplier par 50 l'énergie produite par ces ressources, et les ressources de thorium permettraient encore plus que de doubler le tout. Au total, le potentiel de développement se compte en milliers de Gtep, de quoi voir venir !

Un développement important et durable de l'énergie nucléaire repose à la fois sur une meilleure utilisation des ressources naturelles, et sur l'ouverture de nouveaux débouchés. Sans entrer ici dans le détail des différentes filières nucléaires, nous donnerons quelques coups de projecteur permettant de mieux comprendre quelles sont les nouvelles voies possibles et quelles seraient les stratégies qui en découlent.

5. Ouvrir de nouvelles voies

Les réacteurs nucléaires se classent en trois grandes familles :

- les réacteurs à neutrons thermiques utilisant de l'uranium faiblement enrichi (par exemple, les réacteurs à eau ou eau lourde) ;
- les réacteurs à neutrons thermiques et à fort enrichissement (par exemple, les réacteurs à haute température refroidis par gaz, HTR) ;
- les réacteurs à neutrons rapides (par exemple, Superphénix, refroidi au sodium liquide).

Les premiers sont de gros producteurs de plutonium ; les seconds, enrichis au plutonium, peuvent en être de gros consommateurs ; les troisièmes en consomment pratiquement autant qu'ils en produisent, et sont en fait des machines à brûler le ^{238}U , isotope qui représente 99,3% de l'uranium naturel, ouvrant par là même la voie à un développement durable de l'énergie nucléaire.

Les espoirs mis dans les HTR de puissance moyenne reposent sur l'extrême robustesse de leur combustible, qui permet, pour autant que leur puissance ne soit pas trop forte, de simplifier les systèmes de sûreté sans affaiblir celle-ci. Elle permet également d'aller vers des températures élevées, et ainsi d'améliorer les rendements thermodynamiques. Des réacteurs de ce type, mieux adaptés à des réseaux de taille moyenne, peuvent ouvrir la voie à de nouveaux marchés, à condition d'y être compétitifs.

À échéance plus lointaine, la technologie des HTR pourrait ouvrir la voie à des réacteurs rapides refroidis par gaz, et à des réacteurs à très haute température permettant d'ouvrir de nouveaux débouchés dans la thermochimie (production d'hydrogène et carburants liquides de synthèse).

L'immense majorité des réacteurs actuellement en service appartient à la première famille, mais des réacteurs prototypes de puissance significative appartenant aux deux autres familles (HTR et RNR refroidis au sodium) ont été construits et exploités avec succès, apportant une expérience précieuse pour leur développement futur, et permettant de se faire une idée de leurs coûts, comparés à ceux des réacteurs de la première famille (Tableau 4).

D'autres filières peuvent être envisagées et font l'objet d'études (y compris des filières utilisant le thorium), mais elles ne peuvent intéresser que le très long terme. Nous ne les aborderons pas ici, car elles ne modifient pas profondément la problématique du nucléaire.

Tableau 4
Coûts du kWh – REP, HTR, RNR à métal liquide (centimes d’euro par kWh)

Table 4
Cost per kWh – PWR, HTR, liquid-metal fast reactor (euro cents per kWh)

REP – 1000 à 1500 MW	1
HTR – 2 à 300 MW	1,25 à 1,5
RNR métal liquide – 1000 à 1500 MW	

6. Quelles stratégies ?

La politique de gestion du plutonium et l’économie vont donc être au cœur de toutes les stratégies d’utilisation de l’énergie nucléaire et de gestion de ses déchets. Nous examinerons trois stratégies, représentatives de grands choix de société : la poursuite de la politique actuelle, la sortie du nucléaire et le développement durable du nucléaire.

6.1. Poursuite de la politique actuelle

C’est une stratégie d’expectative, fondée sur les réacteurs de la première famille, avec ou sans recyclage du plutonium, laissant ouvertes toutes les possibilités.

Le parc nucléaire mondial produit chaque année environ 75 tonnes de plutonium, entreposé dans le combustible usé UO₂ ou uranium–plutonium (Mox). Ce plutonium pourra être récupéré plus tard, soit pour être brûlé, soit pour amorcer une filière rapide.

Tôt ou tard, cette stratégie butera sur le problème des ressources en uranium, mais cette échéance est à un horizon beaucoup plus lointain que 2020–2030, sauf si le parc nucléaire mondial devait fortement augmenter d’ici là.

En complément d’une telle stratégie, l’industrie pourrait vouloir développer des réacteurs à haute température pour répondre à des besoins spécifiques de pays ne disposant pas de grands réseaux électriques ; ceci ne modifierait pas profondément la problématique des ressources, ni celle du plutonium.

6.2. Stratégie de sortie du nucléaire

Une telle stratégie, telle que celle décidée par l’Allemagne, par exemple, se traduirait par l’arrêt progressif des centrales actuelles d’ici 2020–2030.

Elle se traduirait probablement par des tensions sur l’approvisionnement en gaz naturel, seul à même de combler le vide sans trop augmenter les émissions de CO₂ ; par voie de conséquence, il faudrait s’attendre à une forte hausse du prix de l’électricité.

Elle laisse sans réponse la question du devenir des 2000 ou 3000 tonnes de plutonium accumulé dans le combustible usé : l’enfouir de façon irréversible, avec les inconvénients que nous avons notés, ou l’entreposer ?

Dans sa définition actuelle et malgré les apparences, la stratégie n° 2 laisse donc, comme la stratégie n° 1, beaucoup de problèmes en attente.

6.3. Stratégie de développement durable du nucléaire

La seule stratégie qui corresponde à un développement durable de l’énergie nucléaire est celle qui permet de brûler la plus grande partie de ²³⁸U et, ce faisant, de multiplier par au moins 50 l’énergie fournie par tonne d’uranium naturel, tout en augmentant fortement les ressources d’uranium naturel économiquement exploitables. Le plutonium ne joue plus alors que le rôle d’intermédiaire, sans s’accumuler.

Une telle stratégie peut parfaitement se combiner avec la première, pour autant que l’on n’ait pas enfoui les combustibles usés dans un stockage irréversible.

7. Le cadre juridique et administratif

La plupart des filières de production d’électricité nécessitent des investissements élevés, qui ne peuvent être amortis que sur des durées suffisamment longues. C’est notamment le cas pour le nucléaire et pour les moyens de transport du gaz naturel, son principal concurrent. Les investisseurs ont besoin d’une visibilité à long terme des conditions dans lesquelles ces filières pourront être exploitées. Dans le cas du gaz naturel, il s’agit de perspectives raisonnables de marchés, sous forme par exemple de contrats à long terme. Le nucléaire, lui, a besoin d’un cadre juridique et administratif stable et, autant que possible, homogène dans le monde.

Nos amis, mais concurrents, américains l’ont bien compris. Depuis le début des années 1990, l’administration américaine a stabilisé le cadre réglementaire concernant le nucléaire existant, et a profondément

modifié les procédures relatives à de nouveaux projets. C'est ainsi que plusieurs modèles nouveaux de réacteurs à eau sont aujourd'hui « certifiés » et que s'engagent des procédures d'approbation de nouveaux sites. La certification de modèles nouveaux confère un avantage certain à l'industrie américaine sur les marchés mondiaux.

L'Europe et la France ont probablement des enseignements à tirer de l'exemple américain.

8. Conclusion

En résumé, le développement du nucléaire au cours des prochaines décennies devrait s'imposer, parce qu'il sera de loin l'énergie la moins chère et une ressource durable, ne rejetant pas de gaz à effet de serre.

Mais ce développement sera fonction de la capacité de nos sociétés à surmonter les obstacles qui l'entravent ; il faut pour cela développer une pédagogie du risque et faire des choix de stratégie pour l'aval du cycle.

Comme les autres filières de production d'électricité, le nucléaire a besoin d'un régime réglementaire stable sur de longues périodes. Soumis comme elles à la mondialisation, il a également besoin de règles techniques, aussi universelles que possible.

Les réacteurs actuels sont les mieux à même de satisfaire les besoins à moyen terme dans des conditions économiques.

À plus long terme, de nouveaux systèmes nucléaires devront être développés progressivement, en complément des systèmes actuels, d'une part pour permettre un développement durable de cette forme d'énergie, d'autre part pour lui ouvrir de nouveaux débouchés. Deux voies apparaissent aujourd'hui prometteuses : les réacteurs à neutrons rapides, seuls à même de bien valoriser ^{238}U , et les réacteurs à haute température, ouvrant la voie à des procédés thermochimiques de production d'hydrogène et de combustibles liquides de synthèse.

Remerciements

L'auteur tient à remercier tout particulièrement les membres de la commission Énergie – Environnement de l'Académie des technologies pour leurs précieux conseils, et M.R. Dautray, dont le rapport sur les déchets nucléaires [3] a fortement inspiré sa présentation.

Références

- [1] AIEA, International Safety Advisory Group (INSAG).
- [2] P. Bacher, Peut-on se passer du nucléaire ?, in : Le Dossier du Nucléaire, La Jaune et la Rouge, novembre 2000, pp. 7–14.
- [3] R. Dautray, L'énergie nucléaire dans le cadre temporel des changements climatiques, rapport à l'Académie des sciences, décembre 2001.