

Les cahiers de

GLOBAL

CHANCE



Le nucléaire en débat

N'avons nous pas le temps d'élaborer
des solutions acceptables ?

Global Chance

Association loi de 1901
à but non lucratif
(statuts sur simple demande)

**41 rue Rouget de Lisle
92150 Suresnes**

Le Conseil d'Administration
de Global Chance
est composé de :

Benjamin DESSUS
Ingénieur et économiste
Président de l'Association
Jean-Pierre ORFEUIL
Chercheur
François PHARABOD
Ingénieur chercheur
Trésorier de l'Association
Arthur RIEDACKER
Agronome
Philippe ROQUEPLO
Ingénieur et sociologue
Jean-Claude RAY
Secrétaire de l'Association

Les cahiers de Global Chance n° 11 Avril 1999

Directeur de publication :
Benjamin DESSUS
Rédaction :
François PHARABOD
Maquette :
Ivan PHARABOD
Imprimerie :
N.R.J.B. - Montmorency

Sommaire

Long terme et nucléaire

Philippe Roqueplo

5

Le nucléaire du futur

Existe-t-il de nouvelles options pour le cycle du combustible?
Jean-Paul Schapira

11

Nucléaire et effet de serre

Les scénarios de la Commission énergie 2010-2020 du Plan
Benjamin Dessus

22

Le temps du réalisme

Peut-on sauver la technologie nucléaire du déclin?
Dominique Finon

30

La sortie du nucléaire en Allemagne

Le scénario " Tournant Energétique 2020 " de l'Öko-Institut
Uwe Fritsche, Cristof Timpe

38

Quel marché?

Les tendances du marché de la production d'électricité dans le
monde
Samir Allal

45

Editorial

Pourquoi reprendre aujourd'hui, dans les "Cahiers de Global Chance", le débat sur le nucléaire que nous avons engagé il y a six ans déjà dans nos colonnes? L'arrivée de la Gauche plurielle au pouvoir et des Verts au gouvernement, la signature du protocole de Kyoto sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la fermeture de Superphenix, la décision gouvernementale de création de laboratoires souterrains de stockage des déchets radioactifs, la décision d'abandon du nucléaire par le gouvernement de la République fédérale d'Allemagne, autant d'éléments nouveaux qui montrent la nécessité d'un débat de fond sur l'avenir de la filière nucléaire en France.

Vingt-cinq ans après le premier choc pétrolier et le lancement du programme Messmer, il n'est pas trop tard pour accepter enfin un débat en France sur l'avenir du nucléaire, "dogme énergétique" jusqu'ici indiscutable.

Comment réexaminer la pertinence des choix au regard des besoins énergétiques nationaux et mondiaux, de l'évolution des marchés et des techniques, de la montée des préoccupations environnementales à long terme apparues depuis le début des années 90? La question est d'autant plus cruciale que non seulement le parc nucléaire français fournit en 1999 de l'ordre de 80 % de l'électricité nationale, mais aussi et surtout que ses enjeux masquent en fait des enjeux institutionnels, culturels, politiques et sociaux déterminants pour notre pays. Trois arguments principaux justifient aux yeux de ses défenseurs le maintien de cette exception française² : l'indépendance énergétique, la lutte contre l'effet de serre et l'enjeu industriel pour la France. Ses détracteurs au contraire insistent sur les problèmes de sûreté, de pollution radioactive et surtout sur ceux de l'aval du cycle (retraitement et stockage à long terme des déchets nucléaires) pour justifier une diversification vers des sources fossiles (le gaz) ou renouvelables, voire une sortie à terme du nucléaire.

Dans un contexte international où le nucléaire voit ses parts de marché régresser dans la plupart des pays du monde ou au mieux stagner dans quelques-uns, la France doit-elle et peut-elle :

- rester l'exception en poursuivant sa politique de monoculture nucléaire?
- abandonner la filière nucléaire comme plusieurs de ses voisins?
- ou, au contraire, proposer et participer à l'élaboration d'une politique scientifique et industrielle nouvelle, transparente et socialement acceptable, capable de résoudre définitivement les problèmes de l'aval du cycle et donc d'apporter une solution significative dans une trentaine ou une quarantaine d'années au défi de la production électrique aussi bien dans les pays riches que dans les pays en développement?

Ces Cahiers de Global Chance s'ouvrent par une réflexion de fond de Philippe Roqueplo sur la nécessité ou la non nécessité du nucléaire. L'exigence d'un nucléaire propre sur le long terme justifie de reconsidérer les développements technologiques envisagés actuellement au profit d'une redéfinition complète du nucléaire. D'autant que ce qu'il appelle "le répit climatique" semble donner un temps pour cette reconstruction.

C'est à la définition de cet autre nucléaire que l'article de Jean-Paul Schapira contribue. À partir d'une analyse détaillée des déchets associés au cycle uranium actuel, il montre qu'il existe de nouvelles options pour le nucléaire du futur. En particulier un nouveau cycle du combustible élaboré à partir du thorium constituerait une alternative intéressante du point de vue des déchets.

Analysant les scénarios énergétiques du Plan pour 2020, Benjamin Dessus met en perspective la relation entre nucléaire et effet de serre souvent mise en avant par les promoteurs du nucléaire à l'occasion des grands débats internationaux sur le changement climatique. Il ressort de cette analyse que ni le respect des engagements de Kyoto ni l'échéance du renouvellement du parc électrique français ne sauraient justifier un recours massif au nucléaire. Dominique Finon analyse les raisons du déclin de l'industrie nucléaire et les conditions d'une relance éventuelle de cette technologie dans les pays industrialisés. Devant une situation internationale du nucléaire lourde d'incertitudes, il s'interroge sur les composantes d'une politique énergétique réaliste en France.

L'affichage récent d'une volonté de sortie du nucléaire en Allemagne modifie profondément les termes du débat énergétique en France. Le scénario allemand présenté par l'Öko-Institut pose les bases d'une nouvelle politique énergétique soutenable. La France peut-elle rester une singularité dans un monde en changement ?

Ce monde de l'énergie n'est plus celui des années 70 dans lequel les grands programmes d'équipement, souvent centralisés, dominaient. L'article de Samir Allal montre bien combien la flexibilité des marchés donne une prime aux équipements de taille modeste et aux technologies qui concilient critères économiques et protection de l'environnement. Dans ce contexte, le marché du nucléaire apparaît aujourd'hui marginal et ne saurait justifier, à lui seul, le maintien d'une exception française.

Les analyses présentées dans ce numéro ouvrent donc le débat sur deux aspects essentiels : la nécessité ou non du nucléaire, et les options pour un nucléaire propre et sûr. Nous vous en souhaitons bonne lecture.

Benjamin Dessus et François Pharabod

1 Voir "Les Cahiers de Global Chance" n°2 "Global Chance et le nucléaire", 1993 et "Les Cahiers de Global Chance" n°3 "L'Énergie en débat", 1994.

2 Le nucléaire ne représente que 30% de la production d'électricité en Allemagne par exemple.

Long terme et nucléaire

Philippe ROQUEPLO

Le nucléaire est-il nécessaire ?

Si je pose ici la question de la nécessité ou de la non nécessité du nucléaire, ce n'est nullement pour prendre cette question à mon compte mais pour la récuser et la remplacer par une autre : celle, précisément que j'entends poser. En effet la question de la nécessité du nucléaire n'a aucun sens si l'on ne précise pas pour qui et pour quoi ce nucléaire serait nécessaire. Est-il d'ailleurs possible, voire même souhaitable, que tout le monde, partout et tout le temps, y réponde de la même manière? N'est-ce pas, pour une grande part, affaire de contexte? Et d'abord : quel nucléaire? A supposer que le nucléaire puisse être jugé - ici ou là - nécessaire, le sera-t'il de façon absolue ou sous certaines réserves, sous certaines conditions? Quelles réserves? Quelles conditions?

Depuis près de 25 ans je fais partie des militants anti-nucléaires : ceci signifie que, pour un certain nombre de raisons, la mise en place de l'énergie nucléaire me paraît constituer un malheur auquel, par un certain nombre de moyens, il convient de s'opposer. Encore faut-il s'entendre sur le sens de cette opposition. C'est une opposition qui se veut constructive, au sens d'abord où se battre pour qu'un malheur soit évité revient à chercher à construire une société meilleure. Mais c'est aussi une opposition constructive dans le sens où les arguments mis en avant pour lutter contre la stratégie nucléaire imposée par un cer-

“Global Chance est une association de scientifiques qui s’est donné pour objectif de tirer parti de la prise de conscience des menaces qui pèsent sur l’environnement global (“global change”) pour promouvoir les chances d’un développement mondial équilibré”. Tels sont les premiers mots de la charte de notre association, telle qu’elle fut présentée en juin 1993 à la dernière page du numéro 2 de ses cahiers, numéro en tête duquel se trouvait un dossier intitulé “Global Chance et le nucléaire : débattre de l’avenir de l’énergie nucléaire”. Le présent article s’inscrit dans cette problématique.

tain groupe de responsables officiels sont des arguments solides qui méritent d'être entendus. Tel fut le cas pour de nombreux arguments mis en avant par le mouvement anti-nucléaire en France et celui-ci, malgré son apparente défaite, a donc puissamment contribué à l'amélioration du programme nucléaire français.

De toute façon, le maintien ou le développement du nucléaire en France ne constituent en rien une fatalité. Il ne peut s'agir que d'une décision qui ne saurait être imposée - fût-ce au nom de la nécessité - par les opérateurs du nucléaire - quels qu'ils soient -

mais qui relève des seuls détenteurs légitimes du pouvoir de décision, c'est-à-dire du gouvernement légalement élu et dûment éclairé sur la question. Encore faut-il qu'il le soit. A ce propos il sera permis de citer deux extraits du fascicule de présentation de la Conférence de Citoyens qui a eu lieu fin juin sur les Organismes Génétiquement Modifiés¹ : *“Dans une démocratie représentative, les responsables politiques doivent souvent avoir un rôle d'éclairer par rapport au reste de la population, mais encore faut-il qu'ils soient eux mêmes éclairés sur la portée réelle des choix à faire... Les conférences de consensus ou de citoyens et le débat public qui doit en principe s'instaurer ensuite doivent justement contribuer à faire prendre conscience à ces responsables politiques de l'importance et de la complexité de certaines décisions qu'ils doivent prendre.”* Tel est précisément l'un des rôles de ceux qui s'opposent aux inconditionnels du nucléaire et c'est en se plaçant à ce point de vue qu'ils ont affirmé - souvent preuves à l'appui - la non-nécessité de l'énergie nucléaire, c'est à dire la possibilité de s'en passer.

Cependant une possibilité n'est jamais qu'une possibilité et l'évolution de la conjoncture peut contrarier cette possibilité. Tel apparaît aujourd'hui à beaucoup la conjoncture due à la prise de conscience des conséquences climatiques probables de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Nombreux sont cependant ceux qui croient pouvoir montrer que cette conjoncture ne suffira pas à rendre le nucléaire nécessaire. Autrement dit : ceux qui pensent que l'on pourrait encore très probablement, malgré la menace climatique, se passer de l'énergie nucléaire et que, en tout état de cause, moins il y en aura mieux - toutes choses égales d'ailleurs - cela vaudra.

Il n'est peut-être pas impossible que - à condition de le vouloir vraiment et d'agir en conséquence - l'on puisse se passer de l'énergie nucléaire et cela malgré la menace climatique due à l'accroissement de l'effet de serre. Cependant il me paraîtrait téméraire d'affirmer catégoriquement que tel sera effectivement le cas. Je considère donc que l'application du principe de précaution fait obligation de ne

réfuser a priori dans l'avenir aucune sorte d'énergie et qu'il convient très concrètement de mettre tout en œuvre pour que toute catégorie d'énergie puisse éventuellement intervenir s'il advient que son usage s'avère concrètement nécessaire à un moment donné. Cela me paraît valoir pour l'énergie nucléaire, mais pas pour n'importe quelle énergie nucléaire : pour un nucléaire à la fois sûr et propre.

Du point de vue de la sûreté, il nous a longtemps été dit que le nucléaire français était extrêmement sûr, ce qui n'empêche pas les officiels du nucléaire de fonder en la matière la stratégie à venir sur l'amélioration de la sûreté. Tel est en particulier le cas du projet franco-allemand EPR, sur lequel je reviendrai. Or, quoi qu'il en soit de sa sûreté améliorée, il doit être au moins clair que ce projet ne constitue pas un projet de nucléaire “propre” dans la mesure où non seulement il ne résout pas le problème - toujours non résolu - des déchets à vie longue, mais où, par son recours généralisé au combustible MOX, il le complique. Sûr ou non, le projet EPR n'est pas un projet “propre”.

La question des déchets nucléaires

Je crois nécessaire de me référer ici à la séance d'auditions publiques réalisée le 4 mars 1998 par l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques sous la présidence de Claude Birraux et qui fut précisément consacrée à ce projet de réacteur franco-allemand (EPR).

Au cours de ces auditions et des débats auxquels elles ont donné lieu, il fut manifeste que les divers intervenants étaient habités par des problématiques différentes, essentiellement trois.

- La première problématique était celle adoptée par les industriels responsables du projet EPR : Siemens et Framatome, auxquels se sont adjoints EDF et ses homologues allemands ainsi que l'administration (Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires et son

homologue allemand). Il s'agit pour eux de fabriquer un réacteur "évolutionnaire" et non pas "révolutionnaire" en bénéficiant au maximum du retour d'expérience et en se focalisant sur l'amélioration de la sûreté du réacteur, de ses conditions de gestion, de sa durée de vie (portée à 60 ans!) et de sa productivité économique globale. La question des déchets est explicitement considérée comme une question à résoudre en dehors de ce projet.

- La deuxième problématique reposait sur la conviction qu'il ne peut y avoir d'avenir pour l'énergie nucléaire que si tout le cycle du combustible est pris en compte. Pour les tenants de cette position, il est assez vain, sinon stratégiquement dangereux, de considérer la seule sûreté des réacteurs eux-mêmes, quel que soit par ailleurs l'intérêt évident de rendre celle-ci la meilleure possible. C'est la position qui fut exposée par le représentant du Ministère de l'Environnement et il m'a semblé que la Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires, tout en soutenant vigoureusement le projet EPR, y était assez favorable. J'ai par ailleurs cru comprendre dans le débat que c'était la position de Claude Birraux lui-même. C'est d'ailleurs ce qui ressortait déjà de son rapport de mars 1997 sur le contrôle de la sûreté et de la sécurité des installations nucléaires où il déclarait à propos du projet Rubbia : *"J'ai désormais acquis la conviction que (souligné dans le texte) la véritable maîtrise des déchets radioactifs ne pourra provenir que de ruptures scientifiques et technologiques profondes. En ce sens je rejoins parfaitement les perspectives tracées par l'équipe Rubbia : la filière doit former un tout, dont l'utilité n'est réelle que si elle est pleinement optimisée à chaque stade : réacteur et cycle du combustible. Il me paraît illusoire de prétendre, même à long terme, maîtriser la production et l'élimination des déchets dans le cadre des filières existantes"*(pp. 285-286).

- La troisième position adoptée au cours du débat du 4 mars 1998 était celle qui prend en considération la nécessité de placer l'énergie nucléaire dans une politique énergétique globale à long terme en prenant en particulier en compte le problème de l'effet de serre.

Il me semble évident qu'il faut mener de front ces trois problématiques, mais en les articulant avec lucidité, ce qui me conduit à formuler les propositions suivantes :

1. La raison primordiale qui pousse à lancer rapidement le projet EPR réside manifestement dans cette forme de "précaution" qui consiste à entretenir la compétence nucléaire en Europe, en particulier en France : chez Framatome et dans l'ensemble du tissu industriel concerné par les réacteurs (qu'il s'agisse de l'entretien du parc actuel ou de la fabrication effective des réacteurs). C'est une considération à court terme, mais susceptible d'être très importante, y compris pour le long terme.
2. La nécessité de résoudre durablement le problème des déchets est évidente. Faute d'y parvenir ou d'afficher fortement la volonté d'y parvenir, il est à craindre que le nucléaire devienne socialement inacceptable, ce qui risque de constituer une conséquence désastreuse et supprimerait d'ailleurs tout intérêt au projet EPR.

La question qui se pose est donc de savoir - quoi qu'il en soit par ailleurs du projet EPR qui s'inscrit résolument dans le cadre des filières existantes - s'il ne convient pas d'adopter en matière nucléaire une attitude "révolutionnaire" afin d'aboutir, selon les termes de Claude Birraux à "une véritable maîtrise des déchets radioactifs" qui, précisément, ne saurait selon lui être obtenue en s'inscrivant dans le cadre des filières existantes (dont l'EPR).

Reste à savoir si une telle "véritable maîtrise des déchets radioactifs" est possible.

L'exigence d'un "nucléaire propre"

Que faut-il entendre par "un nucléaire propre" et jusqu'à quel point l'exigence de propreté constitue-t-elle un impératif?

Plus encore que la notion de nécessité, celle de propreté ne prend sens que référée à un certain contexte écologique et culturel. Appliquée à une industrie, il y a "propreté" lorsque les effluents et déchets de cette industrie sont éco-

logiquement, sanitaires et culturellement acceptables. Or la notion d'acceptabilité est manifestement une notion relative. La question est donc : est-il envisageable que la question des déchets nucléaires à vie longue soit un jour résolue d'une façon qui soit socialement acceptée et définitivement acceptable?

Il me semblerait indispensable de faire ici un bilan de la situation de l'ensemble des déchets, dans l'ensemble des pays de la planète : en particulier des déchets de l'industrie chimique. Est-il si évident que les déchets radioactifs de l'industrie nucléaire soient considérablement plus menaçants que certains déchets des usines chimiques? Est-il évident que les sommes allouées à la protection des populations soient rationnellement réparties entre ces deux types de déchets? Ne conviendrait-il pas que soit sérieusement ouvert ce dossier comparatif? Il y a gros à parier qu'une telle enquête montrerait à quel point, indépendamment de la nocivité "objective" (si tant est que cette notion ait un sens), la pollution radioactive pose partout dans le monde une question "socialement spécifique" et ceci d'autant plus que les sociétés sont davantage "développées".

Une question stratégiquement majeure sera ici la comparaison entre la nocivité (réelle et/ou ressentie) des déchets nucléaires et celle résultant des modifications climatiques imputables à l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. C'est ici que j'introduirai la notion de "répit climatique"

Que penser de l'urgence qu'il y aurait à lancer la filière EPR ?

Je prendrai ici pour première hypothèse que le nucléaire ne saurait être socialement accepté sans véritable maîtrise de ses déchets et comme seconde hypothèse que, comme le dit Claude Birraux, il est illusoire de s'attendre à ce qu'une véritable maîtrise des déchets nucléaires soit possible dans le cadre du nucléaire actuel (étant entendu que, du point de vue des déchets, l'EPR s'inscrit dans le cadre de ce nucléaire

actuel puisque - selon les déclarations explicites de ses promoteurs - il n'en dérive que par une "évolution" fondée sur l'accumulation des retours d'expérience).

Sous réserve de la véracité de ces hypothèses, il en résulte que, si excellent que puisse être l'EPR, son utilité ne peut être que provisoire. En effet il ne remplit pas l'une des conditions nécessaires pour être socialement accepté, du moins accepté d'une façon significative, c'est-à-dire dans des proportions susceptibles d'être prises en considération en matière d'évolution climatique sur une longue durée (un ou plusieurs siècles). Il est donc dangereux - pour ne pas dire suicidaire - d'en appeler à ce type de réacteur pour bâtir un avenir énergétique à long terme. Si nucléaire il doit y avoir, ce doit être un autre nucléaire et il est essentiel que les investissements en EPR - si tant est qu'ils aient jamais lieu - n'imposent aucune irréversibilité en ce domaine. Donc qu'ils soient réduits au strict minimum. Telle est précisément la thèse que je voudrais ici soumettre à discussion et à laquelle je puis m'attendre à plusieurs objections.

Première objection. Du point de vue des industriels, le maintien des compétences est évidemment une question majeure et l'on peut à son sujet évoquer le principe de précaution : ce serait en effet courir un risque considérable que de perdre - faute d'activité productrice suffisante - la capacité de répondre à des commandes dont l'exécution s'avérerait urgente : on ne saurait bloquer ainsi l'avenir par imprévoyance. Certes! Mais on ne saurait non plus bloquer l'avenir en négligeant de mettre au point des procédés de production d'énergie qui puissent politiquement donner lieu à commandes. A quoi bon le maintien des compétences s'il s'agit d'une filière inacceptable? De toute façon il faudra multiplier les sources d'énergie et pallier le risque énorme de voir un nouveau Tchernobyl bloquer la quasi intégralité de la production d'électricité en France.

Deuxième objection. Le vieillissement du parc nucléaire et la nécessité de prévoir le remplacement des centrales existantes. A quoi je me risquerai à suggérer la réponse suivante: il n'est nul-

lement évident qu'il faille remplacer les centrales nucléaires actuelles par d'autres centrales nucléaires. Il apparaît même qu'EDF envisage d'un œil favorable de les remplacer - au moins partiellement - par des centrales au gaz. Il semble que ce soit plus économique et qu'il ne doive y avoir aucune difficulté d'approvisionnement en gaz pendant au moins une cinquantaine d'années.

Troisième objection. La menace climatique interdirait de recourir au gaz, ce recours dût-il être provisoire. Il convient ici de distinguer deux aspects de cet argument :

- Tout d'abord l'aspect physico-chimique de la question: quelle serait l'incidence qu'aurait sur le climat le fait que la France (seule) passerait progressivement et provisoirement au gaz, toutes choses restant égales par ailleurs? A quoi il ne semble pas téméraire de répondre que - du strict point de vue de la physico-chimie de l'atmosphère et de ses conséquences climatiques - cette incidence serait négligeable.
- Deuxième aspect: quoi qu'il en soit de la physico-chimie de l'atmosphère, un tel recours au gaz serait contraire aux engagements pris. Pas nécessairement, du moins si la stratégie des permis négociables est adoptée et si la France achète de tels permis. Bien entendu cela accroîtrait le coût de l'opération. Cela peut sembler absurde, mais tel n'est pas le cas dans la problématique où, à longue échéance, le recours à l'énergie nucléaire deviendrait "climatiquement nécessaire". En ce cas il serait alors encore bien plus absurde de la part d'un pays nucléairement aussi avancé que la France de ne pas avoir préparé le nucléaire de l'avenir et il serait tragique que, faute d'avoir réalisé ce nucléaire de l'avenir, le monde en soit réduit à persévérer dans un nucléaire "du passé" politiquement inacceptable.

Là est, me semble-t-il, le vrai débat. Non pas franco-français, mais mondial. Oui ou non, faudra-t-il dans cinquante ans que, pour des motifs climatiques, l'énergie nucléaire soit utilisée à grande échelle dans le monde?²² Il me paraîtrait téméraire de répondre de façon catégorique par la négative. Mais il n'en est que plus indispensable

de mettre au point l'énergie nucléaire susceptible d'être ainsi utilisée à grande échelle. Ce serait alors une énorme responsabilité que de ne pas avoir engagé les recherches nécessaires pour y être parvenu en temps voulu.

Conclusion. Le lobby nucléaire fait à mon avis une erreur terrible en cherchant à engager l'avenir dans une filière qui ne se justifie que par des motifs industriels à court ou moyen terme. Il ferait une erreur non moins terrible (du moins à ses propres yeux) en ne faisant pas - tant au niveau international que national - l'énorme effort de recherche qu'exige l'éventuelle nécessité à long terme de l'énergie nucléaire : comparé à l'enjeu potentiel de cette dernière considération, l'enjeu industriel invoqué pour se contenter d'une stratégie "évolutionnaire" est de moindre poids. De deux choses l'une : ou il faudra du nucléaire ou on en n'aura pas besoin et la logique voudrait que ceux qui parient sur la nécessité à long terme du nucléaire ne soient pas ceux qui courent le risque de cadencasser ce même nucléaire en nourrissant l'illusion qu'ils finiront bien par l'imposer irréversiblement.

De toute façon, ce n'est pas seulement pour le nucléaire qu'un énorme effort de recherche s'impose. Cela vaut pour toutes les formes d'énergie, qu'elles soient actuellement compétitives ou non.

Le répit climatique, le recours au gaz

Du point de vue des menaces climatiques dues à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, il semble bien que la "fenêtre temporelle" disponible pour substituer en tout ou partie le gaz au nucléaire puisse être suffisamment longue pour pouvoir être exploitée efficacement, mais elle n'en risque pas moins d'être limitée à quelques dizaines d'années. S'il en est ainsi, ceux qui croient à la nécessité d'un recours ultérieur massif au nucléaire ne doivent pas envisager ces quelques dizaines d'années comme un répit et considérer qu'il est par conséquent urgent d'engager un puissant programme de recherches en vue de parvenir à un nucléaire qui soit véritablement un

"nucléaire du futur". Sur ce point, un bref article du *Courrier International* du 14 janvier (p.34) déclarait à propos du rubbiatron : *"Il reste à concrétiser cette belle idée. Carlo Rubbia se dit "tout à fait confiant" mais les experts s'accordent à penser qu'un tel système a peu de chance de voir le jour avant une vingtaine d'années"*. Et alors? J'ignore si le projet Rubbia est ou non le projet de l'avenir, mais si vraiment tel était le cas, qu'est-ce que vingt ans quand il s'agit, purement et simplement, de l'avenir? Ceci dit je reste convaincu que, quelle que soit la filière envisagée, l'énergie nucléaire est une énergie à très haut risque et que, en tant que telle, ce serait un malheur que de se trouver dans la nécessité d'y avoir massivement recours. Si cette nécessité s'imposait, encore faudrait-il ne pas se contenter d'imposer au monde un moteur de sous-marin des années 50... même si c'est la seule chose que les industriels actuels se déclarent capables de réaliser.

Ce dernier point a explicitement été envisagé au cours de l'audition publique consacrée à l'EPR, lorsque Claude Birraux qui présidait la séance a posé avec insistance, en se tournant du côté de l'IPSN, du CEA et de Framatome, la question suivante : *"Est-ce qu'un scénario de cœur entièrement nouveau qui prendrait en charge notre préoccupation première, la réduction des déchets, a été prévu? Comment peut-on minimiser la production de plutonium ou de produits de fission ou avoir des produits différents? Est-ce qu'un cœur complètement nouveau a été examiné, envisagé, étudié? Sinon, pour quelle raison?"*. Or, à cette question, il obtint deux réponses.

Première réponse, de la part du représentant du CEA : *"...si c'est le plutonium qui est visé, les voies à long terme sont dans les combustibles sans uranium 238. A l'échéance dont nous parlons, d'un déploiement possible des EPR, il ne me paraît pas réaliste d'envisager au début de leur vie autre chose que les combustibles qu'on connaît aujourd'hui..."*. Ce point sera étudié par Jean-Paul Schapira dans l'article suivant, je ne m'y attarderai donc pas. Du moins est-il important de sou-

ligner à quel point c'est la logique industrielle qui prévaut en cette affaire. Cela nous est d'ailleurs explicitement affirmé par le même représentant du CEA : *"Le CEA n'est pas leader, nous intervenons seulement en soutien des industriels."*

La deuxième réponse manifeste encore davantage ce poids de la logique conservatrice des industriels. Il n'est que d'écouter le Directeur Général de Siemens : *"L'idée était de créer un produit commun qui serait évolutionnaire, qui puisse représenter un développement ultérieur approfondi des solutions adoptées jusque là..."*. De même le représentant des électriciens allemands : *"Nous voulions pour nos ingénieurs et les ingénieurs de nos producteurs, c'est-à-dire des centrales nucléaire, sauvegarder le know how permettant de maintenir en fonctionnement les centrales allemandes et d'en construire de nouvelles si cela s'avérait nécessaire."*

Il me semble qu'on ne saurait laisser l'avenir du nucléaire coincé à tel point par une problématique à court terme résultant de la conception purement "incrémentale" de l'innovation imposée par les industriels pour des raisons - d'ailleurs fort compréhensibles - de survie de leurs entreprises. Abandonner le nucléaire aux mains de ses promoteurs semble - du moins est-ce la conclusion des analyses ici proposées - conduire à une impasse.

Si paradoxal que cela puisse paraître il n'est pas impossible que les "opposants" à ce type de nucléaire doivent demeurer vigilants et actifs. En effet comme l'écrit Alexandre Adler dans l'éditorial du *Courrier International* déjà cité : *"Une industrie comme le nucléaire a besoin d'une forte opposition permanente pour être contrainte à développer des mesures de sécurité : elle prospérera paradoxalement dans le stress de son imminente disparition, en inventant sans cesse des technologies nouvelles qui répondent mieux aux inquiétudes légitimes du public. Cette dialectique se trouve au cœur même de toute démocratie industrielle : le pouvoir technique a besoin d'une contestation institutionnelle pour progresser."* ■

Notes

1. Dans le cadre de l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques.
2. Ce qui d'ailleurs serait en tout état de cause loin de suffire à pallier la menace climatique.
3. Les soulignés sont de moi.

Existe t-il de nouvelles options pour le nucléaire du futur ?

Jean-Paul SCHAPIRA

Au lendemain de la deuxième guerre mondiale, l'énergie nucléaire était considérée par ses partisans comme la solution d'avenir au problème de l'énergie. Elle allait, dès 1955, bénéficier d'un soutien massif de la plupart des Etats industriels et plus spécialement des puissances dites nucléaires, à l'exception de la Chine, c'est à dire les Etats-Unis, l'URSS, le Royaume-Uni et la France. C'est à cette époque, vers le milieu des années soixante, que s'impose dans la plupart des pays qui s'engagent dans la construction de centrales, et sous l'impulsion de l'industrie nucléaire américaine, la filière dite à uranium enrichi et à eau ordinaire (pressurisée REP ou bouillante REB). En France cette filière est adoptée tardivement en 1969, lorsque la filière nationale graphite-gaz utilisant de l'uranium naturel développée par le CEA est

abandonnée au profit des réacteurs à eau (REP) dont EDF va équiper l'ensemble du parc électronucléaire français. Le tableau 1 donne une image de la situation mondiale en 1998 du nucléaire civil que l'on a classé en trois grandes catégories. Ces données appellent les observations qui suivent.

Le nucléaire a démarré au cours des années 60 dans les pays développés (zone OCDE) et en URSS; ces pays industrialisés sont les initiateurs de la technologie nucléaire et disposent des ressources correspondantes. Bien qu'aujourd'hui la quasi totalité du nucléaire y soit concentrée, on constate pour les pays de l'OCDE des situations très contrastées quant à la part du nucléaire dans la production d'électricité. Ceci

résulte de différences d'une part entre les possibilités concurrentes d'approvisionnement énergétique et d'autre part entre les contextes sociopolitiques dans lesquels le nucléaire s'est implanté depuis le milieu des années 60 (proximité de l'Etat, puissance nucléaire militaire, système décisionnel, rôle du marché...). En revanche, et si l'on se réfère à la distribution des pays à l'époque de l'URSS, la situation apparaît plus homogène dans les pays de l'Est et de l'ex-URSS parce que le développement énergétique y découlait dans une large mesure d'une vision idéologique commune, imprégnée de scientisme, de ce que devait être le "développement des forces productives". On constate également que le nucléaire se

développe aujourd'hui dans les pays de l'Est et dans les pays en développement, et non dans les pays de la zone OCDE, si l'on met à part le Japon qui a des projets ambitieux de construction de réacteurs et d'installations industrielles du cycle qui ne sont pas aujourd'hui engagés (un seul réacteur en construction). Tous

ces développements sont fondés pour la quasi-totalité des cas sur les technologies actuelles (cycle uranium-plutonium, réacteurs à eau, retraitement, entreposage, stockage direct ou non). Il est à noter cependant que le devenir des combustibles irradiés sortant des centrales est encore bien moins défini pour les pays de

l'Est et en développement qu'il ne l'est pour les pays de la zone OCDE qui font l'objet principal de ce papier.

Le nucléaire est probablement appelé à décroître en importance dans les pays de la zone OCDE sous les effets conjugués de la libéralisation généralisée du marché de l'électri-

Tableau 1 : Situation de l'énergie nucléaire dans le monde en 1998 - (source : AIEA Bulletin, 40, 2, 1998)

PAYS (rangés par % nucléaire décroissant)	% nucléaire dans la production d'électricité (mars 1998)	En service		En construction	
		Nombre de tranches	Total MW	Nombre de tranches	Total MW
Pays de l'OCDE					
FRANCE	78,2	59	62853	1	1 450
BELGIQUE	60,1	7	5 712	-	-
SUEDE	46,2	12	10 040	-	-
SUISSE	40,6	5	3 079	-	-
JAPON	35,2	54	43850	1	796
ALLEMAGNE	31,8	20	22 282	-	-
FINLANDE	30,4	4	2 455	-	-
ESPAGNE	29,3	9	7 320	-	-
ROYAUME -UNI	27,5	35	12 928	-	-
ETATS-UNIS	20,1	107	99 188	-	-
CANADA	14,2	16	11 994	-	-
PAYS-BAS	2,8	1	449	-	-
SOUS TOTAL	-	329	282 150	2	2246
Pays de l'Europe de l'Est et de l'ex-URSS					
LITHUANIE	81,5	2	2 370	-	-
UKRAINE	46,8	16	13765	4	3 800
BULGARIE	45,4	6	3 538	-	-
SLOVAQUIE	44	4	1632	4	1 552
SLOVENIE	39,9	1	632	-	-
HONGRIE	39,9	4	1 729	-	-
ARMENIE	25,7	1	376	-	-
REP. TCHEQUE	19,3	4	1648	2	1 824
RUSSIE	13,6	29	19843	4	3 375
ROUMANIE	9,7	1	650	1	650
KAZAKHSTAN	0,6	1	70	-	-
SOUS TOTAL	-	69	46253	15	11201
Pays en développement					
COREE DU SUD	34,1	12	9770	6	5 120
ARGENTINE	11,4	2	935	1	692
AFRIQUE DU SUD	6,5	2	1 842	-	-
MEXIQUE	6,5	2	1 308	-	-
INDE	2,3	10	1695	4	808
BRESIL	1	1	626	1	1 245
CHINE	0,8	3	2167	4	3 090
CHINE (TAIWAN)	?	6	4 884	?	?
PAKISTAN	0,6	1	125	1	300
IRAN	0	-	-	2	2 111
SOUS TOTAL	-	39	23352	19	13366
TOTAL MONDE	21	437	351 795	36	26 813

cité, d'un développement modéré des besoins en électricité et surtout des difficultés socio-politiques que rencontre depuis des décennies la technologie nucléaire. La libéralisation du marché ouvre la niche nucléaire (c'est le cas fort de la France et de la Belgique) à la concurrence avec d'autres modes de production d'électricité qui privilégient du point de vue de l'électricien le court terme (essentiellement le gaz).

Il en résulte pour une entreprise comme EDF l'adoption d'une stratégie d'attente et de désengagement partiel vis à vis du nucléaire. Bien que l'annonce d'une commande de principe d'un réacteur EPR soit attendue prochainement, il n'en reste pas moins que EDF souhaite s'en tenir d'une façon durable (jusqu'en 2070!) au monorecyclage du plutonium dans les combustibles MOX (Mixed OXide, oxyde mixte uranium-plutonium) dans environ 20-22 réacteurs du palier 900 MW de manière à ne pas avoir à faire retraiter annuellement plus de 850 tonnes de combustibles usés (sur un total de 1 200 tonnes) à l'usine UP2-800 de la Hague, évitant ainsi de s'impliquer dans l'autre usine UP3 spécialisée jusqu'à présent dans le retraitement des combustibles usés des clients étrangers de COGEMA (essentiellement l'Allemagne et le Japon). La stratégie de EDF s'oppose sur ce point crucial à celle de la COGEMA, fortement défendue par les députés C. Bataille et R. Galley dans leur dernier rapport de

l'Office Parlementaire des Choix Scientifiques et Technologiques.

Du côté du cycle du combustible, la COGEMA rencontre probablement des difficultés à signer de nouveaux contrats de retraitement avec des clients étrangers et est présentement confrontée à un problème de rupture des contrats 1990 avec l'Allemagne. Elle semble bien tardivement s'orienter vers une diversification des services du combustible et le contentieux avec l'Allemagne pourrait paradoxalement y contribuer à travers le conditionnement des combustibles usés non retraités que COGEMA pourrait réaliser avant leur retour en Allemagne.

Le nucléaire actuel, fondé sur l'utilisation de l'uranium, pose un difficile problème de déchets à long terme

A coté de ces difficultés, essentiellement liées à la libéralisation du marché de l'électricité et de la montée d'une prise de conscience des problèmes de l'environnement, la stratégie à plus long terme dans le domaine nucléaire doit pouvoir apporter une réponse satisfaisante à la question centrale des déchets nucléaires, si l'on souhaite maintenir le nucléaire comme une option pour le prochain siècle. L'impact des déchets nucléaires sur l'homme et sur l'environnement est dû aux risques radiologiques que présentent les corps radioactifs qu'ils contiennent et au

mode de gestion qui est adopté. Il faut prendre en compte à cet égard l'ensemble des opérations du cycle électronucléaire générateur de déchets, de l'extraction minière jusqu'au stockage définitif.

Quel que soit le cycle électronucléaire adopté, il y aura nécessairement et quoique l'on fasse des résidus de la fission nucléaire qui seront générés à raison d'environ 46 kg par milliard de kWh thermiques produit par le réacteur, et dont l'impact ne dure que pendant quelques siècles pour près de 94 % d'entre eux.

En revanche, on a des possibilités d'action sur les *paramètres d'un cycle donné* pour limiter la quantité de corps lourds, caractérisés par des vies longues et une radiotoxicité élevée, qui sont mobilisés ou créés à l'occasion de la production de l'électricité. Dans le cas actuel des cycles fondés sur l'uranium naturel, ces corps lourds sont (voir annexe) :

- a.** les descendants de l'uranium (Th-230, Ra-226, radon) séparés de l'uranium en amont du cycle, lors des opérations d'extraction minière et de purification;
- b.** l'uranium de rejet de l'usine d'enrichissement;
- c.** l'uranium irradié et l'ensemble des transuraniens (neptunium, plutonium, américium et curium) fabriqués lors de l'irradiation aux neutrons et que l'on trouve dans les combustibles usés déchargés des réacteurs.

On peut selon la teneur du minerai en uranium et le réglage de l'usine d'enrichissement obtenir des quantités très différentes de déchets des catégories a/ et b/. Il en est de même des déchets c/ dont les quantités dépendent de nombreux paramètres : composition du combustible (uranium enrichi, MOX par exemple), taux de combustion, spectre en énergie des neutrons (réacteurs à neutrons lents ou rapides, réacteur à modération accrue). Les risques réels associés dépendent de leur mode de gestion et de traitement : séparation chimique, recyclage, stockage et mode de conditionnement des colis de déchets...

La transmutation comme moyen de réduire les risques associés aux corps à vie longue

On peut réduire en principe les risques à long terme associés aux corps à vie longue en recourant à leur transmutation en réacteur. Il s'agit d'une méthode qui vise à réduire l'impact à long terme des déchets (radiotoxicité, chaleur dégagée), en transformant des radionucléides à vie longue dans des noyaux atomiques stables, en transitant éventuellement par des corps à durées de vie nettement plus courtes et en tout cas compatibles avec une durée de surveillance institutionnelle crédible. La transmutation suppose une

séparation chimique préalable au cours de laquelle des déchets secondaires sont produits ; insuffisamment décontaminés en corps à vie longue, ces déchets devront être stockés en profondeur. Aussi la transmutation peut contribuer à simplifier le concept de stockage et à réduire les incertitudes sur les effets à long terme, mais ne peut se substituer à lui, du moins en l'état actuel des techniques.

La transmutation ne concerne que les corps à vie longue créés à l'intérieur des combustibles des réacteurs, à savoir :

- le plutonium qui représente la quasi totalité de la radiotoxicité pendant au moins 100 000 ans ;
- les actinides mineurs (Np, Am, Cm) qui contribuent majoritairement à la radiotoxicité dès lors que celle du plutonium a été neutralisée ou fortement réduite.
- les produits de fission à vie longue (iode-129, césium-135, technétium-99...) qui contribuent majoritairement au risque réel pour la plupart des scénarios accidentels dans les stockages profonds.

Le problème du plutonium

Le monorecyclage du plutonium dans les réacteurs à eau, pratiqué aujourd'hui en l'absence de surgénérateur (voir annexe), a pour effet de brûler le 1/4 du plutonium recyclé, les 3/4 restant dans les assemblages MOX irradiés. En supposant un parc EDF produisant chaque année 400

TWh^{él} à partir de réacteurs N4-UOX et REP-MOX dont les caractéristiques sont données au tableau 1 de l'annexe, il est facile de voir que le monorecyclage de la totalité du plutonium formé dans les réacteurs N4-UOX conduirait à une production annuelle de 7,5 tonnes de plutonium concentré dans les assemblages MOX au lieu de 11,8 tonnes qui serait produit en cycle ouvert dans les combustibles usés UOX. Cette réduction s'accompagne par contre d'une augmentation de la production des actinides mineurs qui passe de 1,4 tonnes à 2,1 tonnes. Le monorecyclage du plutonium est donc une opération qui réduit les quantités de plutonium et le concentre dans un nombre restreint d'assemblages avec production de déchets de retraitement (verres, déchets B). Les assemblages MOX usés que l'on ne traite pas dégagent près de 10 fois plus de chaleur que les assemblages usés standard UOX et posent des problèmes spécifiques de gestion en entreposage ou en stockage (emprise au sol, surveillance, corrosion accrue, dégagement de chaleur à long terme due aux actinides...). Le monorecyclage d'une partie du plutonium produit à l'intérieur des combustibles usés risque fort d'aboutir à une impasse. Comme pour des raisons économiques qui deviendront de plus en plus prédominantes, il n'y a guère d'incitation à aller au delà d'un seul recyclage en REP, la stra-

tégie aujourd'hui proposée conduira à terme au stockage direct des combustibles usés non retraités, ceux chargés avec de l'uranium enrichi et ceux chargés avec du combustible MOX. Or ces derniers présentent aussi bien en entreposage qu'en stockage des risques à long terme plus importants qu'avec les combustibles usés standard, liés à une augmentation de la radiotoxicité et du dégagement de chaleur provenant d'une production nettement accrue d'actinides mineurs (américium et curium) conséquence du recyclage du plutonium. Ce pronostic pourrait s'avérer inexact en partie si un programme de réacteurs à neutrons rapides, lié à un problème de ressource en uranium, apparaissait et utilisait le plutonium fortement dégradé contenu dans les combustibles MOX usés. Mais cela serait-il le cas, et l'on ne pense plus que cette éventualité se réalise avant 2050-2070, que l'on n'est nullement assuré qu'un tel programme puisse absorber de telles quantités de plutonium. Des solutions de multirecyclage qui boucleraient vraiment le cycle vis à vis du plutonium ne sont pas aujourd'hui retenues. Le multirecyclage du plutonium pourrait en effet se concevoir sous certaines conditions dans l'ensemble des REP ou sous forme d'assemblages sans uranium, ce qui permettrait de stabiliser l'inventaire de plutonium au bout de 40-50 ans à un niveau très inférieur aux stocks de plutonium des MOX usés provenant du mono-recyclage actuel.

Le problème des actinides mineurs

Il n'y a aucune pratique industrielle du recyclage ou de l'incinération des actinides mineurs. Différentes solutions sont à l'étude montrant que leur transmutation pose des problèmes notamment de radioprotection, de performances de séparation chimique difficile dans le cadre des techniques actuelles, de tenue des matériaux et de sûreté des réacteurs. Le problème du curium est en particulier complexe à traiter en transmutation.

Le problème des produits de fission à vie longue

Là également se poseront des problèmes de séparation chimique, voire isotopique (cas du césium-135), de tenue des matériaux et de disponibilité de neutrons dans les réacteurs. A cet égard les systèmes sous-critiques assistés par accélérateur (comme celui proposé par C. Rubbia) pourraient simplifier la transmutation des actinides mineurs (la sous criticité offre des marges de sûreté plus importantes qu'avec les réacteurs critiques) et les produits de fission à vie longue (surplus de neutrons). Il s'agit d'opérations techniquement complexes dont les effets bénéfiques qui reposent pour l'essentiel sur une décontamination poussée des déchets produits lors du recyclage, ne se font sentir qu'après au moins 50 ans de fonctionnement du système nucléaire.

La loi déchets de décembre 1991

Face à ces nouvelles techniques, le stockage profond constitue aux yeux des promoteurs du nucléaire la seule solution crédible qui permette d'isoler durablement, sur plusieurs centaines de siècles, les déchets à vie longue (verres et déchets de faible et moyenne activité de la catégorie B, combustibles usés non retraités). Et cette solution est partout étudiée mais rencontre d'énormes difficultés d'application. En France, les fortes oppositions qui se manifestèrent autour des quatre sites prospectés par l'ANDRA dans les années 80 pour l'implantation d'un laboratoire de qualification d'un stockage, amenèrent le Gouvernement Rocard à un moratoire et à faire adopter par le Parlement une loi déchets prévoyant d'une part une durée de 15 ans pour élargir l'éventail des solutions de gestion des déchets de haute activité et à vie longue et définissant d'autre part un processus d'évaluation des recherches à mener durant ces 15 années et dont les résultats devraient fonder une décision des Pouvoirs Publics en 2006. La loi déchets du 30 décembre 1991 transforme donc le problème des déchets en un enjeu de recherche pour les organismes de recherche (ANDRA et le CEA), autour de trois axes :

- la séparation des corps à vie longue contenus dans les combustibles usés (plutonium, actinides mineurs, certains produits de fission à vie longue) et leur transmu-

tation en corps stables, l'objectif étant donc de raccourcir dans le temps les durées de gestion 'active' des déchets (environ 100-300 ans) ;

- le stockage profond réversible ou non dont la réalisation doit être précédée d'études à mener en laboratoire souterrain en vue de qualifier au moins deux sites a priori favorables; c'est ainsi que le site de l'Est dans l'argile vient d'être retenu par le Gouvernement le 9 décembre dernier et que celui dans le granit de la Vienne a été rejeté suite aux recommandations de la Commission Nationale d'Evaluation, une commission d'experts instituée par la loi de 1991;

- le conditionnement et l'entreposage longue durée des déchets; ici une décision a été prise par le Gouvernement pour que soit étudié un entreposage en subsurface dans une formation granitique.

Il n'en reste pas moins que le recours actuel à l'uranium enrichi puis au monorecyclage du plutonium dans les REP complique largement la gestion à long terme des déchets et amène à envisager, au-delà de la solution du stockage, des solutions lourdes et pénalisantes au plan industriel telles que la séparation et la transmutation qui visent in fine à réduire la radiotoxicité à long terme des déchets en fissionnant le plus possible les actinides produits inéluctablement dans un tel cycle.

Le thorium est une alternative intéressante du point de vue des déchets

L'utilisation du thorium à la place de l'uranium pourrait conduire plus simplement à des performances identiques à celles qui font appel aux techniques spécifiques de transmutation. De nombreuses études anciennes concernant un autre type de combustible fondé non pas sur le cycle uranium - plutonium, mais sur le cycle thorium - uranium, ont été réactualisées depuis la fin des années 80. Ce nouveau type de combustible peut apporter une réponse au problème des déchets à vie longue en évitant les nombreuses difficultés évoquées ci-dessus.

Le thorium est environ trois fois plus abondant dans la nature que l'uranium et se présente essentiellement sous la forme d'un seul isotope, le Th-232. Celui-ci n'est malheureusement pas fissile, mais peut sous irradiation aux neutrons se transformer en un isotope fissile artificiel de l'uranium, l'U-233. Aussi, contrairement au cas de l'uranium qui possède un isotope fissile naturel, l'U-235, le démarrage d'un réacteur chargé avec du thorium nécessite que l'on y ajoute des matières fissiles provenant du cycle uranium, soit de l'uranium enrichi en U-235 à 20 % voire très enrichi à plus de 90 %, soit du plutonium issu du retraitement des combustibles usés actuels ou du démantèlement des armes nucléaires.

L'absence d'isotope fissile naturel du thorium explique pourquoi le nucléaire s'est développé à partir de l'uranium seulement, le thorium apparaissant comme une extension des ressources existantes, au même titre que l'U-238, l'isotope fertile de l'uranium qui pourrait être consommé dans les réacteurs surgénérateurs, via le plutonium.

On peut aujourd'hui argumenter en faveur du thorium, non sous l'angle des ressources, mais sous l'angle déchets. En effet le cycle thorium utilise U-233 comme combustible de base, dès lors qu'il se substitue progressivement au plutonium que l'on fissionne dans le réacteur. Le passage à un véritable cycle thorium-uranium a donc comme premier avantage de détruire le plutonium séparé, civil ou militaire, au profit de U-233. Ceci peut s'envisager dans divers types de réacteurs existants, dont les REP, mais aussi dans des systèmes sous-critiques assistés par accélérateurs, analogues à celui proposé par C. Rubbia, qui présentent l'avantage de nécessiter moins de matières fissiles de départ.

Lorsque le cycle thorium-uranium est établi, le problème des déchets à vie longue est singulièrement réduit. Ce cycle impose que l'on retire les combustibles usés supposés solides afin de récupérer l'U-233 et de renvoyer aux déchets de haute activité l'ensemble des produits de fission, le protactinium (situé entre thorium

et uranium dans le tableau de Mendeleev) mais extrêmement peu de ces actinides situés au-delà de l'uranium (neptunium, plutonium, américium et curium) et qui sont copieusement produits dans les combustibles actuels à base d'uranium ou de plutonium. La raison physique de cette situation réside dans la difficulté de les synthétiser à partir de l'U-233 pour passer à la famille supérieure, celle du neptunium (Np-237); il faut en effet 4 captures successives pour atteindre U-237 le premier isotope de l'uranium qui soit instable par désintégration β -vers Np-237. Et la synthèse des isotopes du plutonium à partir de ce dernier corps est encore plus difficile. En fait c'est la présence de l'U-238, comme c'est le cas dans les combustibles actuels, qui ouvre la voie aisée vers la fabrication des actinides supérieurs (plutonium, américium et curium). Il s'ensuit que la radiotoxicité des déchets est au moins dix à cent fois plus faible avec ce nouveau cycle qu'avec les cycles actuels recyclant le plutonium et ce pour une période de temps s'étendant jusqu'à environ 10 000 ans après le déchargement.

Outre la forte réduction de radiotoxicité des déchets de haute activité, le dégagement thermique hors produits de fission est également réduit. Ceci a pour conséquence de relâcher certaines des contraintes que l'on rencontre

avec la filière actuelle dans l'entreposage longue durée ou dans le stockage définitif de combustibles irradiés. Il serait également intéressant de comparer les relâchement d'iode dans les deux types de combustibles, compte tenu des différences de propriétés physico-chimiques des oxydes d'uranium et de thorium constituant le support de combustible de chacune des filières.

Enfin, il est établi que les impacts radiologiques à long terme et sur l'environnement de l'extraction minière du thorium sont très largement inférieurs à ceux résultant de celle de l'uranium. Les descendants du thorium décroissent en effet très rapidement (leur tête de série, Ra-228 n'a que 5,8 ans de période comparée celle du Ra-226 qui est de 1 600 ans); par ailleurs les émanations du gaz thoron (équivalent au radon descendant de l'uranium) sont très réduites car il décroît avant de s'échapper à l'air (période courte).

En revanche, il est connu que l'indispensable recyclage de l'U-233 est une opération pénalisante du point de vue de l'irradiation externe due à des rayonnements gamma de très haute énergie émis par les descendants de U-232, un isotope qui accompagne U-233. La fabrication de combustibles à base de U-233 ne peut donc s'envisager qu'en cellules blindées, contrairement à celui du MOX actuel qui se fait en boîte à gants, ce qui est techniquement possible mais entraîne un surcoût.

En conclusion, le passage progressif à des combustibles à base de thorium y compris dans des réacteurs à eau est envisageable. Différents schémas de réacteurs existent : réacteurs à haute température étudié par Framatome dans un autre contexte, incinérateur sous-critique tel que celui proposé par C. Rubbia dans le cadre du programme nucléaire espagnol. Mais, plus simplement, on pourrait concevoir le futur réacteur EPR afin qu'il puisse être chargé avec de tels combustibles pour équiper vers 2020-2030 la génération suivante de réacteurs.



ANNEXE

Quelques données de base sur le cycle du combustible, les déchets nucléaires et les options actuelles de gestion des combustibles irradiés déchargés des réacteurs

Le cycle du combustible

La production d'électricité d'origine nucléaire s'accompagne de déchets, c'est à dire de matières sans valeur économique et qui contiennent des corps radioactifs. Ces déchets

sont produits tout le long du cycle nucléaire qui va de l'extraction de l'uranium au stockage géologique profond.

Le cycle amont regroupe l'ensemble des opérations qui conduisent à la fabrication du combustible standard (oxyde d'uranium enrichi) des réacteurs à eau pressurisée (REP). Les étapes sont représentées à la figure 1 où les quantités sont normalisées à la production annuelle d'un réacteur de 900 MW qui aurait produit environ 5,5 milliard de kWh (5,5 TWh).

Les matières nucléaires sont :

- l'uranium naturel
- l'uranium enrichi
- l'uranium appauvri (statut mixte)
- le combustible frais chargé dans le réacteur.

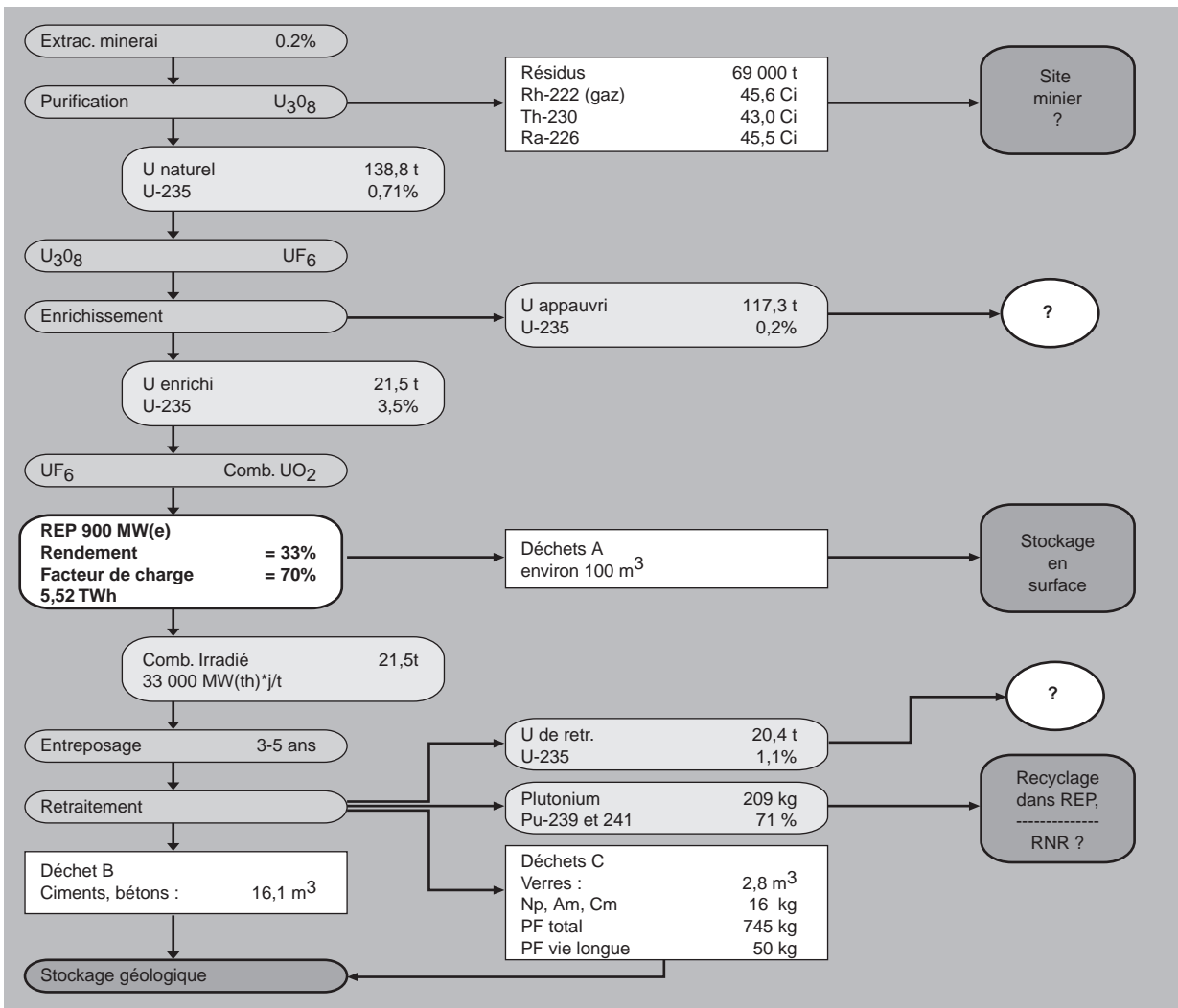
Les déchets sont :

- les descendants de l'uranium formant les résidus miniers
- l'uranium appauvri

Le cycle amont pose deux problèmes de déchets :

- les résidus miniers, classés à très faible activité mais à vie longue (la période du Ra-226 est de 1600 ans, émanation de

Figure 1 : Flux des matières nucléaires et des déchets dans le cycle du combustible avec retraitement (normalisé à un réacteur REP-900 MW)



radon), dont la gestion à long terme est difficile (grandes quantités). Les risques publics sont liées aux émanations de radon et au transport par eau et air de Ra-226.

- l'uranium appauvri, dont seule une faible quantité est utilisée pour la fabrication du MOX (voir plus loin). En l'absence d'usage, cet uranium, dépourvu de ses descendants, représente surtout un risque de toxicité chimique.

Inventaire des combustibles usés

La quasi totalité des corps radioactifs produits dans le cycle du combustible nucléaire, sont contenus dans les combustibles usés déchargés des réacteurs. On les classe en deux grandes catégories :

- les corps plus lourds que l'uranium appelés transuraniens et appartenant à la famille des actinides. Il s'agit d'abord du plus abondant, le plutonium formé au cours du bombardement de l'uranium-238 par les neutrons : il peut être réutilisé dans les réacteurs. A l'inverse, les autres actinides, dits mineurs, sont le neptunium, les isotopes de l'américium et du curium, formés par décroissance radioactive et capture successive de neutrons à partir du plutonium. Le cas du neptunium-237 est à part : il est formé à partir de l'uranium-235 par double capture et décroissance bêta. La plupart des actinides sont caractérisés par une durée de vie longue et une importante radiotoxicité;

ils sont considérés en tout état de cause comme des déchets ultimes.

- les résidus provenant de la fission de l'uranium-235, l'isotope fissile de l'uranium naturel, et des plutonium-239 et 241. Ces résidus constituent les produits de fission, dont la grande majorité sont caractérisés par une période courte, 6 % en poids étant des produits de fission à vie longue (comme technétium-99, césium-135, iode-129). Ils présentent une radiotoxicité faible mais une assez grande mobilité dans l'environnement et sont également considérés comme des déchets ultimes.

Le tableau 1 (page suivante) rassemble les données de production plus précises pour les modèles les plus récents de réacteur à eau fonctionnant en France, utilisant soit de l'uranium enrichi à 4 % (UOX-N4), soit un combustible mixte U-Pu à 8,2 % en Pu (MOX-REP dans un REP de 900 MW (en projet). Ce dernier cas correspond au monorecyclage du plutonium dans les REP 900 MW, pour lequel on constate :

a/ une consommation importante de plutonium (essentiellement sous forme de Pu-239);
b/ une production accrue d'actinides mineurs
c/ un plutonium dont la composition isotopique est fortement dégradée.

Les stratégies de l'aval du cycle

Il existe aujourd'hui au niveau mondial deux modes de

gestion pour les combustibles irradiés : le retraitement et le stockage direct.

Le retraitement, pratiqué en France, Grande-Bretagne, Japon et Russie, qui consiste à extraire de ces combustibles l'uranium (96 %) et le plutonium (1 %), les 3 % restant, produits de fission et actinides mineurs, constituant les déchets dits de haute activité et à vie longue destinés à la vitrification puis au stockage en couches géologiques profonds, après une période d'une cinquantaine d'année d'entreposage de refroidissement.

Les matières récupérées, uranium et surtout plutonium, peuvent être recyclés dans les réacteurs REP (sous la forme de combustibles MOX, uranium/plutonium) ou servir de base, en ce qui concerne le plutonium, à la filière des sur-générateurs (non développée à ce jour). Les installations industrielles correspondantes sont en Europe :

- les usines de retraitement de la Hague (UP2 800 t/an (EDF) + UP3 800 t/an (clients étrangers)), Sellafields - Royaume Uni (THORP, 1 200 t/an);
- les usines de fabrication de combustibles MOX de Dessels - Belgique (35 t/an), de Cadarache (CFCa de 30 t/an), de Marcoule (Melox, 100 t/an extensible à 160 t/an).

Le recyclage du plutonium dans les MOX est fait dans des réacteurs dont 1/3 du cœur est chargé avec ces combustibles. Aujourd'hui 30 réacteurs recyclent le plutonium dans ces

conditions : 2 en Belgique, 16 en France (palier 900 MW), 9 en Allemagne et 3 en Suisse. Par ailleurs 9 autres réacteurs ont obtenus récemment l'autorisation d'être chargés en MOX : 4 en France et 3 en Suisse, tandis qu'il y a 8 réacteurs en demande d'autorisation. Le recyclage n'étant pas poursuivi au delà d'un premier passage, les combustibles MOX

usés sont destinés à un entreposage de longue durée en attente de décision : enfouissement, retraitement.

Le stockage direct des combustibles irradiés après une période également d'entreposage de refroidissement de 50-100 ans. Dans ce cas, le plutonium n'est pas récupéré et est considéré comme un déchet destiné à aller au stockage pro-

fond. Cette solution est retenue aujourd'hui au Canada (la filière eau lourde brûle bien le plutonium in situ), en Suède (sortie du nucléaire en 2010) et aux Etats-Unis (politique de non prolifération). La plupart des autres pays ont des politiques mixtes (ce pourrait devenir le cas en France même) ou des politiques d'attente (voir tableau 2 pour les principaux

Tableau 1 : Bilan des masses d'actinides et des principaux produits de fission à vie longue, présents au déchargement (en kg/TWh) (référence : thèse de S. Sala, Université de Provence, 26 juin 1995)

Isotopes	Période (an)	UOX N4 TCT = 47 500 MWj/t U-235 = 4 % refroidissement = 5 ans			MOX REP TCT = 43 500 MWj/t Pu = 8,2 % refroidissement = 4 ans		
		Masse initiale	Masse finale	Bilan	Masse initiale	Masse finale	Bilan
ACTINIDES MAJEURS (ressources énergétiques, risque potentiel à long-terme) :							
U-234			0,6	+0,6		0,5	+0,5
U-235	7,08 10 ⁸	103	19	-84	6,7	3,5	-3,2
U-236	2,34 10 ⁷		13,6	+13,6		0,7	+0,7
U-238	4,47 10 ⁹	2468	2347	-121	2704	2573	-131
U		2571	2380,2	-190,8	2710,4	2577,7	-133
Pu-238	87,7		0,9	+0,9	6,8	7,5	+0,7
Pu-239	24119		15,4	+15,4	126	63,5	-62,5
Pu-240	6569		7,2	+7,2	59,5	52,8	-6,7
Pu-241	14,4		3,6	+3,6	26,9	24,6	-2,3
Pu-242	3,7 10 ⁵		2,3	+2,3	18,7	21,5	+2,8
Pu			29,4	+29,4	237,9	169,9	-68
ACTINIDES MINEURS (déchets, risque potentiel à long-terme)							
Np-237	2,14 10 ⁶		1,7	+1,7		0,5	+0,5
Am-241	432,2		1,1	+1,1		8,7	+8,7 (8,5)*
Am-242m	152		0	0		0,1	+0,1
Am-243	7380		0,6	0,6		5,4	+5,4
Am			1,7	+1,7		14,2	+14,2
Cm-243	28,5		0	0		0,04	+0,04
Cm-244	18,1		0,2	0,2		2,4	+2,4
Cm-245	8500		0,01	0,01		0,3	+0,3
Cm			0,21	+0,21		2,74	+2,74
PRINCIPAUX PRODUITS DE FISSION A VIE LONGUE (déchets, risque résiduel à long-terme)							
Se-79	70 000		0,02	+0,02		0,01	+0,01
Zr-93	1,5 10 ⁶		2,5	+2,5		1,8	+1,8
Tc-99	2,1 10 ⁵		2,7	+2,7		2,9	+2,9
Pd-107	6,5 10 ⁶		0,8	+0,8		1,9	+1,9
Sn-126	10 ⁵		0,08	+0,08		0,1	+0,1
I-129	1,57 10 ⁷		0,6	+0,6		0,8	+0,8
Cs-135	2 10 ⁶		1,4	+1,4		2,9	+2,9
Sm-151	93		0,04	+0,04		0,01	+0,01
PRINCIPAUX PRODUITS DE FISSION A VIE MOYENNE (contrainte thermique à court terme)							
Sr-90	28		1,6	+1,6		0,9	+0,9
Cs-137	30		3,9	+3,9		4,3	+4,3

(*) production de Am-241 par décroissance naturelle du Pu-241 du combustible neuf

pays de la zone OCDE).

Aujourd'hui, environ 8 000 tonnes de combustibles irradiés sont déchargées par an au plan mondial, avec une production cumulée d'environ 90 000 tonnes non retraitées et entreposées pour l'essentiel en piscine (source AEN de l'OCDE). Si l'on met à part le cas particulier des combustibles métal (cas du Royaume-Uni) dont l'essentiel a été retraité, guère plus de 10 000 tonnes ont été retraités à ce jour, essentiellement dans les usines de la Hague, qui représentent près de 80 % du marché mondial du retraitement. Ces données montrent la situation dominante de la COGEMA sur le marché du retraitement. Les autres pays, qui n'ont jamais fait retraiter leurs combustibles, se limitent quant à eux à entreposer leurs combustibles usés dans les piscines près de réacteurs.

Le stockage géologique profond représente partout la solu-

tion de référence que ce soit pour des combustibles irradiés ou des déchets issus du retraitement (verres, déchets B). Il n'existe au plan mondial à ce jour que des laboratoires méthodologiques ou de qualification au stade pilote. Citons parmi les pays les plus actifs dans ce domaine la Suède (laboratoire de Stripa dans le granit), la Belgique (laboratoire de Mol dans l'argile), la Suisse (laboratoire de Grimsel dans le granit) ou le Canada (laboratoire URL dans le granit). En France, le processus initié par la loi de 1991 a abouti aujourd'hui à la sélection par l'ANDRA de trois sites (le granit dans la Vienne, l'argile dans l'Est et le Gard) pour la construction de laboratoires souterrains; le gouvernement n'a donné son feu vert que pour le site de l'Est (décembre 1998). Enfin, aux Etats-Unis, le DOE (Department of Energy) a choisi un site de stockage dans le Nevada à

Yucca-Mountain (tuff) qui n'a pas à ce jour reçu d'autorisation de construction. D'une manière générale, il ne semble pas possible de démarrer effectivement le stockage géologique profond de déchets avant au moins 2020, dans quelque pays que ce soit. Cette situation traduit bien les difficultés, à la fois technique, scientifique et politique, que l'on rencontre partout pour procéder au stockage définitif de déchets nucléaires. Il faut cependant noter que l'entreposage d'attente de déchets de haute activité est en tout état de cause nécessaire pour des raisons techniques (refroidissement) et ne pose a priori pas de problèmes insolubles d'emprise au sol. ■

Tableau 2 : Données concernant les politiques de gestion des combustibles irradiés (CI) dans des pays de l'OCDE

PAYS	Part de nucléaire [%] (a)	Puissance installée [GW] (a)	Politique de gestion des CI	CI déchargés [tonnes] (b)	CI déchargés [tonnes] (c)	CI retraités [tonnes] (d)
France	76,4	58,5	R-D, (E)	1 150	1 1770	2518
Belgique	55,8	5,5	R, E	120	1 400	403
Suède	51,1	10,0	ST-DIR	250	≈ 3240	
Suisse	36,8	3,0	R, E	85	≈ 1300	285
Espagne	35,0	7,1	E	168	1775	
Finlande	29,5	2,3	E	70	≈ 975	
Allemagne	29,3	22,7	R, E	470	6315	2706
Japon	27,2	38,9	R, R-D	981	≈ 8600	1082
Royaume-Uni	25,8	11,7	R-D, E?	826		
Etats-Unis	22,0	98,8	ST-DIR	2200	≈ 28600	
Canada	19,1	15,8	ST-DIR	1479		
Pays-Bas	4,9	0,5	R, E	15	150	162

a) situation au 1er janvier 1995 (source AIEA)

b) en 1992, source : Agence de l'Energie Nucléaire de l'OCDE

c) CI oxydes, cumulés jusqu'en 1995 (source CE); les données en "italique" ont été estimées à partir de la production cumulée d'électricité d'origine nucléaire (source CEA, 1992) et en prenant une moyenne de 4,2 tonnes de CI par TWhé (cas de l'Allemagne).

d) à la Hague, CI oxydes cumulés jusqu'au 1er mars 1995 (source COGEMA)

R-D : retraitement dans le pays même; R : retraitement effectué à l'étranger;
E : entreposage d'attente de décision; ST-DIR : stockage direct de combustibles usés

Nucléaire et effet de serre

Les scénarios de la Commission énergie 2010-2020 du Plan

L'avenir énergétique de la France se résume-t'il à la question du nucléaire? Quel serait l'impact du renouvellement ou de la réduction du parc électronucléaire sur les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2020? L'analyse des scénarios de la Commission énergie 2010-2020 du Plan permet d'éclairer le débat.

Dans le cadre de ses travaux, la Commission Énergie 2010-2020 du Plan a élaboré pour la France trois scénarios énergétiques à l'horizon 2020¹ pour éclairer les perspectives du moyen terme. Ces scénarios ne prétendent en aucun cas présenter un caractère prévisionnel, mais bien plutôt planter les décors possibles dans lesquels les stratégies des opérateurs, des acteurs sociaux et des gouvernements pourraient avoir à se déployer. Il s'agit donc de scénarios à caractère prospectif destinés à explorer des images du futur qui ne sont pas tendancielles.

Deux options importantes ont été retenues dans l'élaboration de ces scénarios :

- Différencier les scénarios sur la base d'hypothèses touchant à l'évolution de la société et non pas sur la base d'une combinatoire de variables économiques,
- Considérer ces diverses hypothèses d'évolution sociétales comme compatibles et convergentes avec celles des autres pays européens et plus largement de l'OCDE.

D'autre part la Commission a choisi de retenir quelques hypothèses communes aux trois scénarios étudiés, en particulier en ce qui concerne la démographie, les niveaux d'activité et l'évolution des

coûts des énergies sur le marché international. C'est ainsi qu'ont été retenus pour les trois scénarios décrits une croissance de 2,3 % par an jusqu'en 2020 et une évolution des coûts internationaux du pétrole de 15 \$ le baril en 1995 à 24 \$ en 2005, avec un maintien à ce niveau au delà.

Des contextes politiques différenciés

Le scénario S1 "Société de marché" s'organise autour de l'hypothèse d'une baisse du niveau d'intervention économique des pouvoirs publics en France et dans les pays de l'OCDE. L'Etat y fait plus confiance qu'aujourd'hui aux mécanismes de marché pour orienter les choix et réguler les comportements des acteurs. On assiste de ce fait à une contraction de l'horizon temporel des différents acteurs plus sensibles dans ce contexte aux réalités du court terme. Cette contraction est traduite dans ce scénario par le choix d'un taux d'actualisation élevé (12 %) des acteurs privés, alors que dans les deux autres scénarios, le taux d'actualisation actuel (8 %) est conservé.

Dans le scénario S2 "Etat industriel", l'Etat entend conserver et renforcer son rôle d'opérateur stratégique dans le domaine industriel, au nom d'une identification des intérêts à long terme de la nation avec la force et la compétitivité d'une industrie conçue comme nationale. Les politiques publiques ayant des implications énergétiques, par exemple celles concernant la protection de l'environnement, y sont envisagées au travers de la compétitivité et de l'essor de l'industrie française.

Le scénario S3 "Etat protecteur de l'environnement" est axé sur les valeurs de protection de la santé des citoyens et de protection de l'environnement. L'Etat veille à ce que le développement technologique et économique soit compatible avec les exigences de la santé publique et de la restauration de la qualité de l'environ-

nement aussi bien local que global. Par exemple il se propose de respecter les engagements de Kyoto grâce à des mesures domestiques, sans avoir besoin de recourir aux mécanismes de flexibilité (permis négociables, mécanismes de développement propres) en cours d'élaboration. Chacun de ces scénarios fait une description détaillée de la demande énergétique sectorielle aux horizons 2010 et 2020 à partir d'une nomenclature des usages. Le modèle utilisé (MEDEE) combine des variables de parcs (nombre de logements, parc automobile) et des variables d'utilisation (kilomètres parcourus, etc.) ou d'activité (productions de matériaux, etc.).

Leur multiplication par les consommations unitaires d'énergie dérivées de la prise en compte des technologies employées dans ces différents parcs pour satisfaire les besoins finaux (chauffage, déplacements, etc.) permet de déterminer les consommations énergétiques sectorielles. C'est à partir de ces données qu'est établie une image prospective de l'offre d'énergie nécessaire à la satisfaction des besoins recensés.

Les principaux résultats

Des tableaux complets des bilans production consommation d'énergie pour 1992 et 2020 sont présentés en annexe pour chacun des scénarios. Dans ces tableaux, issus du rapport de l'atelier du Plan, la consommation d'électricité finale est présentée avec la convention française (1 TWh = 0,22 Mtep) dite équivalent à la production de l'électricité. Dans la suite de l'exposé quand nous parlerons de consommation finale d'énergie nous emploierons l'équivalent retenu au niveau international dénommé équivalent à la consommation de l'électricité (1 TWh = 0,086 Mtep).

L'évolution de la demande d'énergie

Le tableau 1 (page suivante) montre des évolutions contrastées de la consommation finale d'énergie dans les trois scénarios.

De 150 Mtep en 1992 on passe en 2020 à 164 Mtep (une augmentation de moins de 10 %) dans S3 et à 210 Mtep dans S1 (une augmentation de 40 %) de consommation d'énergie finale pour une croissance du PIB de 80 % au cours de la même période.

L'intensité énergétique finale² du PIB décroît de 0,42 à 0,32 dans le scénario S1 "marché", à 0,29 dans le scénario S2 "Etat industriel" et à 0,25 dans le scénario "Etat protecteur de l'environnement", soit une décroissance annuelle de 1 à 1,9 % selon les scénarios. A titre de comparaison, de 1973 à 1996 l'intensité énergétique avait décliné au rythme moyen de 1,7 %. C'est donc un effort d'efficacité légèrement supérieur à celui des 20 dernières années que propose le scénario S3, mais cependant inférieur à celui observé pendant les chocs pétroliers (3 % par an entre 1973 et 1985).

Du point de vue sectoriel on peut faire les observations suivantes :

- Le premier point qui apparaît est la forte augmentation des consommations d'énergie du secteur des transports dans les trois scénarios, de 21 % dans S3 à 66 % dans S1. La part de consom-

mation des transports augmente dans le bilan 2020 de tous les scénarios, de 31 % en 1992 à 34 % dans le scénario S3, 36 % dans S2 et 37 % dans S1.

- Le second secteur est celui du résidentiel dont l'augmentation de consommation reste cependant beaucoup mieux contrôlée dans tous les scénarios puisqu'elle n'augmente qu'au maximum de 20 % environ dans le scénario S1 et diminue même légèrement dans le scénario S3.

- L'industrie montre une évolution analogue avec une augmentation maximale de la consommation finale d'énergie de 23 % dans le scénario S1 et une stabilisation dans le scénario S3.

- Le tertiaire voit sa consommation augmenter très significativement dans les trois scénarios, de 26 % dans S3 à près de 60 % dans S1.

- La consommation de l'agriculture reste marginale et constante dans les bilans des trois scénarios.

Du point de vue de la consommation d'énergie, on voit donc que les deux secteurs qui posent véritablement problème sont celui des transports (dont on sait la dépendance au pétrole) et celui du tertiaire dont un tiers environ de la consommation finale d'énergie est électrique.

Tableau 1 : Consommations finales d'énergie des trois scénarios du Plan par secteur d'activité

Mtep	1992	S1 2020	S2 2020	S3 2020
Industrie	38,1	47,6	45,3	38,5
Tertiaire	18	28,7	26,4	22,7
Résidentiel	43,8	53,3	48,4	43
Agriculture	3,2	3,1	3,1	3,1
Transports	46,3	76,9	69,0	56,1
Total	149,5	209,6	192,2	163,5

Nota : L'électricité est comptée dans son équivalent final selon la convention internationale (1 TWh = 0,086 Mtep)

Tableau 2 : Approvisionnements énergétiques en 2020 des trois scénarios du Plan

Mtep	1992	S1 2020	S2 2020	S3 2020
Charbon	17,8	13,5	12,5	8,4
Pétrole	95,7	128,5	120,8	98,3
Gaz	27,9	68,2	54,7	46,9
Electricité	79,4	93,7	100,8	92,5
ENR	11,2	13,9	13,6	11,8
Total	232	317,8	302,4	257,9

Nota : L'électricité est comptée dans son équivalent à la production (1 TWh = 0,22 Mtep)

L'approvisionnement énergétique

Les politiques publiques qui sous tendent les différents scénarios se révèlent aussi dans les choix de production d'énergie. Comme il s'agit d'approvisionnement ce tableau est établi en énergie primaire qui implique un coefficient d'équivalence différent pour l'électricité (1 TWh = 0,22 Mtep) qui est censé prendre en compte le rendement global de la filière électricité depuis la mine jusqu'à la sortie des centrales.

Le tableau 2 en résume les principaux éléments.

Les énergies fossiles et les énergies nouvelles renouvelables

On assiste à une augmentation de l'approvisionnement fossile dans les trois scénarios. Très modeste dans S3 avec 8 % d'augmentation (153 Mtep), elle est beaucoup plus significative dans S2 avec 33 % d'augmentation (188 Mtep) et atteint près de 50 % dans S1.

Dans tous les cas le recours au charbon diminue (de 25 % dans S1 à 53 % dans S3).

Dans tous les cas également le recours au gaz augmente considérablement (de 68 % dans S3 à 196 % dans S2 et 240 % dans S1).

Les situations sont plus contrastées pour le pétrole dont l'approvisionnement reste pratiquement stable dans S3 par rapport à 1992 (et en léger recul par rapport à 1996) et augmente de 26 % (+ 25 Mtep) dans le scénario S2 et de 34 % (+ 33 Mtep) dans le scénario S1. Du point de vue de la vulnérabilité aux aléas de l'approvisionnement pétrolier (pénurie ou choc pétrolier) le scénario S3 est donc de loin le mieux placé.

Le recours aux ENR pour la production de chaleur (bois de feu, capteurs thermiques) et pour les transports (biocarburants) pourtant en progression sensible, reste encore modeste en 2020 dans tous les scénarios, de l'ordre de 5 % de l'approvisionnement total d'énergie. Mais le développement des ENR concerne aussi la production d'électricité dans ces divers scénarios (voir ci-après).

L'électricité

La production d'électricité des différents scénarios provient de deux origines distinctes, la production d'électricité dite "primaire" (principalement le nucléaire et l'hydraulique, plus marginalement l'éolien et les déchets organiques), et la production d'électricité à partir de combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz). Pour mieux cerner les différentes options il est

Tableau 3 :
Bilans énergétiques de la production électrique

TWh	1995	S1 2020	S2 2020	S3 2020
Hydraulique	75,8	70	73,3	72,1
Nucléaire	358,8	381,3	427,7	355,1
Thermique	36,7	170,6	98,5	69,2
dont				
Charbon	22,3	26,8	20,9	11,1
Fioul	1,7	11,9	9,9	5,9
Gaz (CC)	1,7	91,9	27,7	0
Autoprod/ Cogénérat	11	40	40	52,2
Eolien	0	0,9	7	17,4
Divers (déchets)	0	5	12	10
Total	471,3	627,8	618,5	523,8
dont exportations	69,8	50	70	30

Tableau 4 : Moyens de production d'électricité nécessaires en 2020 pour les différents scénarios selon la durée de vie des centrales nucléaires (30 et 40 ans)

Gigawatt	S1 2020	S2 2020	S3 2020
Parc existant			
Nucléaire 30 ans	8,2	8,2	8,2
Nucléaire 40 ans	47,1	47,1	47,1
Charbon	5,8	5,8	5,1
Fioul	5,4	5,4	3
Turbines à comb	0,5	0,5	0,5
Diésel	0,9	0,9	0,9
Cogénération	0,5	0,5	0,5
s/total 30 ans	21,3	21,3	18,2
s/total 40 ans	60,2	60,2	57,1
Nouvel Equipement 30 ans			
Nucléaire	0	43,7	30
Cycle comb gaz	50,7	8,5	8,5
Turbines à comb	6,9	5,7	3,2
Cogénération	6	6	8
Eolien	0,1	0,8	2
Déchets	0,6	1,6	1,3
Total nv équip V30	85,6	87,6	71,2
Nouvel Equipement 40 ans			
Nucléaire	0	6,7	0
Cycle comb gaz	16,1	7	0
Turbines à comb	6,8	4,8	2,9
Cogénération	6	6	8
Eolien	0,1	1	2
Déchets	0,6	1,6	1,3
Total nv équip V40	29,6	26,9	14,2

indispensable de détailler les différents moyens de production pour chaque scénario. C'est l'objet du tableau 3.

Ce ne sont pas d'abord les différences de recours à l'énergie nucléaire qui distinguent ces scénarios. En effet si l'on tient compte du fait que les exportations d'électricité nucléaire sont très différentes dans les trois scénarios (de 30 à 70 TWh), les besoins domestiques d'électricité sont assurés par l'énergie nucléaire de la manière suivante : 330 TWh dans S1, 358 TWh dans S2, 325 TWh dans S3, soit un écart maximum de 33 TWh entre les scénarios, de l'ordre de 5 % à 6 % de la production totale d'électricité nécessaire en 2020.

Le tableau 4 a été dressé dans deux hypothèses de durée de vie des centrales nucléaires, 30 ans et 40 ans³. Il montre en particulier que, pour une durée de vie des centrales nucléaires de 40 ans, hors besoins d'exportation, dans aucun des scénarios le renouvellement des centrales nucléaires (8 GW obsolètes en 2020)

n'est envisagé et cela pour des raisons diverses :

- Dans le scénario 1 (le marché) le remplacement des centrales obsolètes est assuré par des turbines à gaz plus économiques.
- Dans le scénario S2 on renouvelle 6 GW de centrales nucléaires qui produisent de l'ordre de 40 TWh destinés à l'exportation.
- Dans le scénario S3 enfin les économies d'électricité, la pénétration de la cogénération et des renouvelables sont suffisantes pour ne pas envisager de remplacement des centrales nucléaires obsolètes ni par de nouvelles centrales nucléaires ni par des centrales à gaz à cycle combiné.

En fait c'est sur le recours aux énergies fossiles (avec ou sans cogénération) et sur les renouvelables que les différents scénarios divergent très sensiblement les uns des autres pour la production d'électricité.

Dans les trois scénarios le retour en force de la production thermique d'électricité est très apparent, sous deux aspects principaux : le cycle combiné à gaz et la cogénération chaleur électricité.

On assiste à une montée en puissance de la cogénération qui atteint 6 GW garantis (40 TWh) dans S1 et S2 et 8 GW (52 TWh) dans S3 contre moins de 2 GW (11 TWh) en 1995. Dans le scénario S1 une très large place est accordée au cycle combiné à gaz avec l'installation de 16 GW à l'horizon 2020 (92 TWh). Dans le scénario S3 enfin 17 TWh d'électricité éolienne (équivalents à 2 GW en base) et 10 TWh (1,3 GW) d'électricité produite à partir de déchets (méthanisation ou incinération) viennent renforcer la participation des renouvelables au bilan d'approvisionnement.

Y compris l'hydraulique, les renouvelables contribuent dans S3 à une centaine de TWh sur les 493 TWh nécessaires au niveau domestique (hors exportation) soit 20 % de la production d'électricité du scénario contre 76 TWh sur 400 TWh en 1995. La progression de 25 TWh est le fait de deux filières principales, l'éolien et la production d'électricité en cogénération à partir des déchets organiques.

Effet de serre

Au titre du protocole de Kyoto, la France s'est engagée à stabiliser en 2010 ses émissions de gaz à effet de serre au niveau de 1990. A plus long terme, en 2020 par exemple il est hautement probable qu'elle sera soumise à une contrainte de réduction d'émissions encore plus importante. On sait bien que les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, méthane, N₂O, CFC, etc.) ne sont pas toutes imputables au système énergétique. Des industries comme les cimenteries, des activités comme l'agriculture contribuent (positivement ou négativement) au bilan d'émission annuelle. Il n'en reste pas moins que les activités énergétiques constituent l'essentiel des émissions du carbone et une bonne part des émissions des gaz annexes⁴.

Le tableau 5 retrace l'évolution des émissions de CO₂ pour les trois scénarios en 2010 et 2020 par rapport à 1990.

On constate immédiatement que les deux premiers scénarios S1 et S2 ne permettent pas (toutes choses égales d'ailleurs) de respecter les engagements de Kyoto en 2010 en ne recourant qu'à des mesures domestiques. Pour satisfaire aux engagements consentis, la France doit se procurer, sur le marché des permis négociables, des permis correspondant à 26 Mt de carbone dans S1 et à 14,5 Mt de carbone dans S2. Dans S3 les mesures domestiques adoptées sont suffisantes pour respecter les engagements consentis même si la durée de vie des centrales nucléaires ne dépasse pas 30 ans. En 2020, le scénario S3 permet encore de respecter un objectif de stabilisation des émissions par rapport à 1990, mais pas de respecter les engagements plus contraignants éventuels auxquels on peut raisonnablement s'attendre pour la période au delà de 2010, d'autant que c'est dans la période 2020-2030 que la plupart des centrales nucléaires du parc actuel arriveront en fin de vie, même avec une durée de vie de 40 ans.

Tableau 5 : Emissions de gaz carbonique des différents scénarios énergétiques

Mt de carbone	S1	S2	S3
1990	104,5	104,5	104,5
2010	131	119	101,5
2020	150	131	106

Ces deux résultats méritent qu'on s'y arrête un instant. Il est en effet tout à fait intéressant de souligner qu'en 2010 et 2020, dans le cas d'une durée de vie de 40 ans des centrales, le scénario S3 permet de satisfaire, sans avoir besoin de renouveler le parc avant 2020 à deux conditions qui sont souvent présentées comme des arguments déterminants pour le renforcement du recours à l'énergie nucléaire : l'indépendance énergétique et le contrôle des émissions de gaz à effet de serre.

Le tableau 6 explicite cette question pour 2010 et 2020.

En 2010

Le scénario S3 est le seul à respecter les engagements de stabilisation des émissions par rapport à 1990 sans avoir besoin de recourir aux mécanismes de flexibilité de Kyoto. C'est en même temps le plus sobre en nucléaire (374 TWh contre 435 TWh dans les autres scénarios), et le moins consommateur de pétrole avec 96 Mtep, la même quantité qu'en 1992, contre 113 dans S1 (+18 %) et 109 dans S2 (+13 %). Il est donc gagnant sur les tableaux effet de serre et vulnérabilité puisqu'il est moins prisonnier des approvisionnements pétroliers dont les transports sont très largement dépendants. De plus quelle que soit la durée de vie (30 ou 40 ans des centrales, ce scénario ne suppose pas de construire de nouvelles centrales nucléaires avant 2010.

En 2020

Le scénario S3 permet encore de maintenir la stabilisation des émissions par rapport à 1990. Il est de nouveau le moins gourmand en pétrole importé (98 Mtep contre 129 dans S1 et 121 dans S2) et le plus sobre en énergie nucléaire (355 TWh contre 381 dans S1 et 428 dans S2).

Les autres scénarios cumulent des importations nettement plus élevées de pétrole et un recours plus important au nucléaire sans pour autant permettre de contrôler les émissions de gaz à effet de serre puisqu'elles dépassent celles de 1990 de 50 % dans S1 et 30 % dans S2.

Si la durée de vie des centrales nucléaires atteint 40 ans, aucun renouvellement du parc nucléaire ne se justifie avant 2020. Par contre, si leur durée de vie n'excède pas 30 ans, il est nécessaire dans le scénario S3 de renouveler partiellement le parc, de 30 GW, portant ainsi le parc nucléaire à 38,5 GW. L'alternative pourrait être de construire 30 GW de centrales à cycle combiné à gaz, mais dans ce cas les émissions de carbone remonteraient à environ 130 Mt5 de carbone en 2020 comme dans le scénario S2.

Éléments de conclusion

L'exercice du Plan apporte des éléments importants sur la question controversée du renouvellement du parc de centrales nucléaires français. Il permet tout d'abord de recadrer le débat en montrant que les choix de parc électriques de production ne constituent pas, pour les 20 ans qui viennent l'essentiel du problème énergétique français. Du point de vue de l'effet de serre et de la vulnérabilité aux aléas le scénario S3, le plus sobre en énergie y compris en électricité nucléaire, apparaît comme le plus robuste.

Dans un tel scénario, dont il faut rappeler qu'il suppose un effort important d'efficacité énergétique et de diversification, la décision de renouvellement du parc de centrales peut être

Tableau 6 : Indépendance énergétique, vulnérabilité énergétique, effet de serre et production nucléaire dans les trois scénarios du Plan en 1992, 2010 et 2020.

	1992	S1		S2		S3	
		2010	2020	2010	2020	2010	2020
Taux d'indépendance %	50	43	37	46	43	45	43
Emissions de carbone	105	131	150	119	131	101	106
Nucléaire (TWh)	330	436	381	435	428	374	355
Importations de pétrole (Mtep)	96	113	129	109	121	96	98

repoussée après 2020, à la condition toutefois de pouvoir assurer dans de bonnes conditions de sûreté et d'acceptabilité sociale une prolongation jusqu'à 40 ans de la durée de vie des centrales nucléaires.

La stratégie sous jacente à ce scénario suppose de prendre à court terme les mesures indispensables à une maîtrise de la croissance énergétique dans le cadre des infrastructures et de l'organisation actuelle de l'appareil productif pour éviter de voir déraiser les consommations d'énergie en France, non seulement d'énergies fossiles responsables d'émissions de gaz à effet de serre, mais aussi d'électricité. Il suppose également d'engager dès maintenant les modifications d'infrastructure et d'organisation porteuses à long terme d'une meilleure efficacité énergétique et de développer avec vigueur les applications aussi bien thermiques qu'électriques des énergies

renouvelables de telle sorte qu'elles puissent jouer un rôle réellement significatif dans le bilan énergétique français des années 2020. Mais une telle stratégie présente le très grand avantage⁶ de repousser d'une vingtaine d'années la "nécessité éventuelle" de construction de nouvelles centrales nucléaires. Ce temps pourrait utilement être mis à profit pour étudier et mettre en place une filière nucléaire réellement propre et socialement acceptable, ce qui suppose à l'évidence que les problèmes de sûreté, de risques de prolifération, et d'élimination des déchets radioactifs à longue durée de vie trouvent des solutions nouvelles, largement débattues dans la transparence et acceptées par la société. ■

Notes

- 1 Energie 2010-2020, rapport de l'atelier "Trois scénarios énergétiques pour la France", Ed. Commissariat général du Plan, septembre 1998.
- 2 Le rapport de la consommation finale d'énergie au PIB.
- 3 En effet le producteur national considère comme très probable la possibilité d'assurer 40 ans de durée de vie aux centrales, mais l'autorité de sûreté se fonde actuellement sur des durées de vie de 30 ans.
- 4 En 1990 les émissions de CO₂ liées à l'énergie représentaient 75 % des émissions totales d'équivalent carbone, 8 % de celles de méthane, 60 % de celles de N₂O (transports et centrales thermiques principalement).
- 5 30 GW fournissent 240 TWh et émettent environ 26 Mt de carbone dans une turbine à cycle combiné (50 % de rendement).
- 6 Si l'on accepte la proposition d'allongement à 40 ans de la durée de vie des centrales nucléaires défendue par EDF.

Annexe :

Bilans énergétiques à l'horizon 2020 établis par la Commission énergie 2010-2020 du Plan

Bilan énergétique en 1992

1992 Mtep	Charbon	Pétrole		Gaz	Electricité		ENR	Total
		Brut	raffiné		Prod.	Conso		
Approvisionnement								
Production	6,8	2,9	0,5	2,8	91,4		11,2	115,6
Importations	14,1	74,4	32,4	27,4	1,1			149,4
Exportations	-0,6		-15,2	-0,9	-13			-29,7
Variations stocks	-2,5	0,2	0,5	-1,3				-3,1
Disponibilités	17,8	77,4	18,3	27,9	79,4		11,2	232
Consommation Branche énergie								
Raffineries		76,5	-71,2		-0,4	0,7		5,6
Centrales élec	7,6		1,6	1,2	-11		0,1	-0,5
Pertes	0,7	0,9	1,2	-0,2	0	16,8	0	19,4
Sous- total	8,3	77,4	-68,4	1	-11,4	17,5	0,1	24,5
Consommation finale d'énergie								
Industrie	7,9		8,4	9,4		27	1,9	54,6
Tertiaire	1,5		18,3	15,5		44,3	9,1	88,7
Résidentiel								0
Agriculture			2,7	0,2		0,5		3,4
Transport			45,6			1,9		47,5
Total	9,4		75,1	25,1		73,7	11,1	194,4

Nota : L'électricité est comptée dans son équivalent à la production (1 TWh = 0,22 Mtep)

Bilan énergétique du Scénario S1 "marché" en 2020

Hypothèse durée de vie des centrales nucléaires 40 ans

2020 S1 Mtep	Charbon	Pétrole Brut	raffiné	Gaz	Electricité Prod.	Conso	ENR	Total
Approvisionnement								
Production					104,8		13,9	118,7
Importations	13,5	75,7	57,1	68,2				214,5
Exportations			-4,1		-11,1			-15,2
Disponibilités	13,5	75,7	53	68,2	93,7		13,9	318
Consommation Branche énergie								
Raffineries		74,4	-69,9		-0,9	0,9		4,5
Centrales élec	6,1		2,7	18,6	-40,9			-13,5
Pertes	0,7	1,3	2,3	2,9		20,1	0	27,3
Sous- total	6,8	75,7	-64,9	21,5	-41,8	21	0	18,3
Consommation finale d'énergie								
Industrie	6,5		7,2	13,9		41,4	3,8	72,8
Tertiaire	0,1		5,5	10,5		30	0,9	47
Résidentiel	0,1		9,4	19,5		39,8	8,8	77,6
Agriculture			2,7	0,2		0,5		3,4
Transport			75,4			2,8	0,4	78,6
Total	6,7		100,2	44,1		114,4	13,9	279,3

Nota : L'électricité est comptée dans son équivalent à la production (1 TWh = 0,22 Mtep)

Bilan énergétique du Scénario S2 "Etat industriel" en 2020

Hypothèse durée de vie des centrales nucléaires 40 ans

2020 S2 Mtep	Charbon	Pétrole Brut	raffiné	Gaz	Electricité Prod.	Conso	ENR	Total
Approvisionnement								
Production					116,4		13,6	130
Importations	12,5	85,4	40,9	54,7				193,5
Exportations			-5,5		-15,5			-21
Disponibilités	12,5	85,4	35,4	54,7	100,8		13,6	302,4
Consommation Branche énergie								
Raffineries		83,9	-78,5		-0,9	0,9		5,4
Centrales élec	4,8		2,2	9,2	-26,9			-10,7
Pertes	0,8	1,5	3	2,4		20,3	0	28
Sous- total	5,6	85,4	-73,3	11,6	-27,8	21,2	0	22,7
Consommation finale d'énergie								
Industrie	6,8		6,5	12,5		40,5	3,7	70
Tertiaire	0,1		5,4	9,8		26,2	0,9	42,4
Résidentiel			8,5	17,2		36	8,6	70,3
Agriculture			2,7	0,2		0,5		3,4
Transport			66,1	0,8		4,3	0,4	71,6
Total	6,9		89,2	40,5		107,4	13,6	257,6

Nota : L'électricité est comptée dans son équivalent à la production (1TWh = 0,22 Mtep)

Bilan énergétique du Scénario S3 "Etat protecteur de l'environnement" en 2020

Hypothèse durée de vie des centrales nucléaires 40 ans

2020 S3 Mtep	Charbon	Pétrole Brut	raffiné	Gaz	Electricité Prod.	Conso	ENR	Total
Approvisionnement								
Production					99,1		11,8	110,9
Importations	8,4	75,5	29	46,9				159,8
Exportations			-6,2		-6,7			-12,9
Disponibilités	8,4	75,5	22,8	46,9	92,5		11,8	257,9
Consommation Branche énergie								
Raffineries		74,2	-69,5		-0,9	0,9		4,7
Centrales élec	2,5		1,3	6,9	-22			-11,3
Pertes	0,6	1,3	2,1	2		18,1	0	24,1
Sous- total	3,1	75,5	-66,1	8,9	-22,9	19	0	17,5
Consommation finale d'énergie								
Industrie	5,2		5,6	10,6		38,1	2,2	61,7
Tertiaire	0,1		5,1	8,5		21,1	0,8	35,6
Résidentiel			7,6	14,9		31,5	8,2	62,2
Agriculture			2,7	0,2		0,5		3,4
Transport			52,2	1,3		5,2	0,6	59,3
Total	5,3		73,2	35,5		96,4	11,8	222,2

Nota : L'électricité est comptée dans son équivalent à la production (1 TWh = 0,22 Mtep)

Peut-on sauver la technologie nucléaire du déclin ?

Dominique
FINON

Ce papier reprend de larges extraits d'un article paru en mars 1999 dans la revue Sociétal sous le titre "Nucléaire : le temps du réalisme ?"

L'énergie nucléaire présente une situation paradoxale. D'un côté, elle constitue une source d'énergie électrique compacte, apparemment bon marché, peu dépendante de la ressource naturelle, présentant un niveau élevé de sûreté dans les démocraties industrielles et permettant de réduire considérablement les émissions de CO₂ de la production électrique, comme le montre l'exemple de la France. D'un autre côté, le développement du nucléaire s'est trouvé pratiquement interrompu dans le monde depuis quinze ans, à l'exception d'un petit nombre de pays industrialisés ou émergents (France, Japon, Corée, Taïwan et à présent la Chine). Plusieurs pays européens (Allemagne, Suède, Suisse) ont choisi le retrait volontaire, tandis que les Etats-Unis prévoient un déclin de moitié de leur capacité actuelle d'ici 2020.

Pour comprendre le destin contrarié de cette technologie, on ne peut plus se contenter d'appréciations sur l'irrationa-

lité des opinions publiques et la faiblesse coupable des gouvernements. En raison même de sa spécificité, l'histoire du nucléaire, encore moins que celle d'autres technologies, ne peut être comprise indépendamment de l'organisation sociale et du système économique de nos sociétés. Par rapport aux autres techniques de production électrique, la technologie nucléaire est marquée par sa complexité extrême et le gigantisme des équipements dans lesquels elle est incorporée, ce qui complique les apprentissages nécessaires à la maîtrise des coûts, limite les possibilités de standardisation, contraint les capacités d'adaptation à un environnement incertain et nécessite un cadre économique capable de sécuriser des investissements lourds. Elle se distingue aussi des autres techniques électriques par des exigences de sûreté très élevées, en raison de la spécificité de ses risques et de l'ampleur des conséquences d'un accident, ce qui nécessite aussi d'élaborer un appareil réglementaire considérable. Enfin elle occupe une place à

part en raison de sa symbolique puissante : très positive à l'origine, elle s'est retrouvée en opposition aux valeurs qui se sont affirmées dans les démocraties industrielles à partir de la fin des années soixante. Elle est devenue un point majeur de focalisation de nouveaux conflits sociaux, en tant que symbole des aspects critiques du contrôle politique dans les sociétés industrielles.

En comparaison de techniques électriques moins lourdes en capital, divisibles, standardisables et peu chargées socialement, ces spécificités ont compliqué la concrétisation des promesses du nucléaire à l'échelle mondiale. Les récents changements de la scène politique et institutionnelle des quinze dernières années, retrait de l'Etat, mouvement de libéralisation et de privatisation des industries électriques, mise en cause des structures de promotion du nucléaire, l'ont encore compliquée un peu plus. Les engagements gouvernementaux à limiter les émissions de gaz à effets de serre peuvent-ils relégitimer la relance des investissements nucléaires? Quelle serait alors la bonne politique à définir dans un pays comme la France dont le modèle culturel et socio-politique a permis de limiter les effets de la contestation et, actuellement, de contenir la libéralisation des marchés alors qu'il continue en même temps d'entretenir une poussée technologique inutile au risque de l'isolement?

Des avantages économiques étroitement dépendants de l'environnement institutionnel et industriel

Dans un contexte institutionnel idéal d'Etat centralisé et fortement présent dans le secteur électrique, comme c'est le cas en France, le nucléaire présente un léger avantage économique en usage de base (> 6000 heures par an) de 1 c/kWh sur 20,5 c/kWh sur les autres moyens de production électrique (cycles combinés à gaz, centrales propres à charbon) qui ont connu un progrès très rapide depuis dix ans. Pour ce faire, ce contexte institutionnel doit permettre d'assurer la stabilité réglementaire et le passage de commandes groupées d'une dizaine de réacteurs pour obtenir des effets de série et de standardisation suffisants, ce qui n'est déjà pas le cas de plusieurs grands pays où l'industrie électrique est fragmentée.

Par rapport aux techniques gaz et charbon, le nucléaire présente aussi un avantage réel en termes de sécurité énergétique et de faible exposition au risque de prix du combustible. Mais cet avantage est atténué par l'abondance de ressources de charbon et de gaz sur les 50 prochaines années. De plus, le nucléaire est lui-même exposé à un risque extérieur sur lesquels les gouvernements n'ont pas de prise,

comme un accident dans un pays où les exigences de sûreté ne sont pas poussées à un niveau élevé, qui provoquerait un rejet social de la technologie.

Quant à l'avantage présenté par le nucléaire par rapport aux autres filières électriques en termes d'externalités environnementales, il s'est accru avec l'émergence des politiques de changement climatique. En se référant au coût marginal de la précaution, le nucléaire reprendrait un avantage significatif (par exemple une valeur du carbone émis de 70 \$/t se répercuterait par une internalisation de 4,5 c/kWh pour les unités à gaz et 8,4 c/kWh pour les unités-charbon). Mais, pour aboutir à un tel constat, il faut admettre que les coûts de fin de vie du nucléaire (démantèlement, déchets) sont maîtrisés, correctement évalués et bien internalisés par des provisions adéquates, ce qui n'est pas le cas. Si on s'aventure à faire une telle supposition malgré l'absence d'expériences, c'est grâce à l'écrasement des dépenses de moyen-long terme par l'actualisation (0,2 à 0,3 c/kWh) qui occulte l'enjeu intergénérationnel, contrairement à la façon dont est traité le risque de changement climatique par la prise en compte du coût marginal actuel de la précaution¹. Une telle approche renvoie in fine au mode d'organisation : au cas où ces dépenses de fin de vie seraient largement dépas-

sées, l'Etat considère qu'il peut sans problème garantir ce risque en ayant le pouvoir de faire payer le moment venu les contribuables ou les clients des monopoles de service public, au lieu de faire payer les consommateurs actuels de kWh nucléaire.

Aussi l'ensemble des avantages économiques du nucléaire ne peuvent se concrétiser que dans des conditions où celui-ci est adossé à un Etat fort et à des grandes organisations monopolistes. De même, la fonction de préférence collective stylisant l'arbitrage entre impacts environnementaux des filières électriques n'a de fondements socio-politiques que là où les institutions autorisent une gouvernance autoritaire et technocratique des risques environnementaux. Là, en effet, sans confrontation d'expertises, on peut faire croire à des choix légitimes au nom de la raison à l'aide d'évaluations monétaires et de comparaisons des impacts et de risques environnementaux de nature fondamentalement différente des filières électriques, comme c'est régulièrement le cas en France. Pourtant cette rationalisation a des limites méthodologiques connues mais occultées, dont beaucoup renvoient à la symbolique des risques et à la réalité des jeux sociaux. C'est bien dans ce point aveugle de l'analyse économique que la vague du nucléaire s'est pour l'heure échouée.

Acceptabilité sociale et influence des institutions

Pour qu'une technique se diffuse dans un champ industriel où elle est en concurrence avec d'autres techniques performantes, il faut non seulement qu'elle soit maîtrisée au plan technologique et qu'elle soit économiquement attrayante pour les investisseurs, mais aussi qu'elle soit acceptée socialement. Si elle l'est difficilement, ceci se répercute sur les deux autres conditions. Les projets d'équipement se heurtent à des blocages juridiques et politiques; la technologie doit être constamment adaptée aux nouvelles demandes de sûreté; les changements réglementaires vont s'appliquer aux équipements en cours de construction; à cause des hausses de devis qui s'en suivent ou des obstacles juridiques, les risques financiers deviennent trop importants pour les investisseurs. Tel a été le cas de la technologie nucléaire dans de nombreux pays.

Les institutions et la culture politique de chaque pays ont joué un rôle fortement structurant dans la constitution de la fonction de préférence collective vis-à-vis du nucléaire. Là où les pouvoirs sont divisés du fait de la décentralisation de l'Etat, de la faiblesse des institutions centrales ou de l'importance du pouvoir juridique, comme c'est le cas aux Etats-Unis ou

en Allemagne, il n'a pas été possible de maintenir les processus décisionnels et réglementaires isolés de l'arène politique. La tendance a été de diviser précocement les institutions centrales en créant des autorités indépendantes de sûreté (1959 en Allemagne, 1974 aux Etats-Unis et en Grande Bretagne, etc.) et des commissions parlementaires spécifiques. La sévèrisation des réglementations y a été d'autant plus rapide et imprévisible qu'elle a été soumise à un jeu politique conflictuel. Comme l'industrie électrique y est aussi souvent divisée par régions, la reprise en main des coûts d'installation y a été d'autant plus difficile². A l'inverse, là où existent une forte centralisation institutionnelle, une tradition administrative d'interpénétration des fonctions de l'Etat (promotion industrielle et contrôle en l'occurrence) et une forte légitimité des entreprises publiques, il a été possible de contrôler la prise en compte des demandes de sûreté et de préserver l'acceptation sociale.

La maîtrise des coûts de la production électronucléaire ne peut être dissociée de l'environnement politico-institutionnel. Les comparaisons internationales montrent des écarts importants vis-à-vis des coûts français où ils ont été les mieux maîtrisés : 100 % et plus pour les Etats-Unis, l'Allemagne et la Grande Bretagne, 70 % pour le Japon,

40 % pour le Canada et la Belgique. Dans les estimations officielles émanant des milieux nucléaires nationaux recensées dans 19 pays par l'OCDE en 1997³, le nucléaire n'apparaît plus compétitif vis-à-vis des centrales au charbon et des unités à gaz que dans 3 pays (France, Belgique, Corée du Sud).

Des techniques concurrentes mieux adaptées

Mais les évolutions technologiques et industrielles en cours amplifient les barrières à la rentrée du nucléaire sur le marché. Dans certains pays, le blocage du nucléaire a suscité un progrès technologique concurrent qui a modifié radicalement l'éventail des techniques de production électrique centralisée. Les centrales propres au charbon sont désormais au point et ont connu des baisses de coût importantes. Les turbines à gaz en cycle combiné (qui représentent la moitié des commandes mondiales de capacité électrique par an et les trois quarts des capacités additionnelles à installer aux Etats-Unis d'ici 2006) connaissent des baisses d'effet de taille considérables (des turbines compétitives de 1 à 100 MW sont désormais offertes et produites en série). Cette technique est bien moins exigeante en capital (une unité de 300 MW nécessite de mobiliser 1 milliard

de F contre 16 milliards pour une centrale nucléaire de 1 450 MW) et convient donc aussi bien à un monopole électrique qu'à un producteur investissant sur un marché en concurrence.

C'est une technologie standardisable, peu exigeante en compétences technologiques du côté de l'acheteur et présentant un bon profil environnemental (elle émet 2,5 fois moins de CO₂ qu'une centrale au charbon). Dans le futur l'émergence annoncée de piles à combustible compétitives pour des auto-productions individuelles pourrait aussi modifier une nouvelle fois l'environnement technologique. Certes les constructeurs nucléaires proposent ou conçoivent des réacteurs améliorés présentant de meilleures performances de coûts et de sûreté, mais leurs débouchés sont toujours contraints par la rigidité de la technologie et des contraintes de taille des unités qui limitent la standardisation et les effets de série.

La libéralisation des industries électriques

Lourdement capitalistique, la technologie nucléaire avait pu se diffuser car les industries électriques étaient structurées en monopoles réglementés, ce qui permettait le transfert sur les consommateurs de tous les coûts et des risques d'investissement associés à l'apprentissage

d'une technologie géante et complexe. Mais le mouvement de libéralisation des industries électriques qui concerne une trentaine de pays et qui s'étend désormais à l'Amérique du Nord, à l'Union Européenne et à un certain nombre d'économies émergentes bouleverse totalement le cadre antérieur d'investissement. La libéralisation électrique supprime la garantie de débouchés et de prix et reporte les risques sur les producteurs. Ceux-ci arbitrent désormais en fonction de critères de rentabilité et de limitation des risques financiers qui sont moins favorables aux investissements nucléaires qu'auparavant. Les taux moyens de rentabilité recherchés sont de 12 % au lieu de 5 à 8 % auparavant.

Or un tel changement entraîne une hausse du prix de revient du kWh nucléaire de 7 à 9 c/kWh, contre seulement 1,5 c/kWh pour les unités en cycles combinés à gaz. De plus, le risque économique associé à ces investissements est difficilement cernable par un financier, comme l'ont montré les difficultés de privatisation d'actifs nucléaires en Grande-Bretagne en 1996. Des incertitudes spécifiques proviennent des risques réglementaires (changements non prévisibles de règles), des performances d'exploitation des équipements, des risques de fin de vie (gestion des déchets, démantèlement), ainsi que du risque de rejet social de la technolo-

gie dans l'éventualité d'un nouvel accident majeur dans le monde.

Les conditions de relance du nucléaire dans les pays industrialisés : adapter le marché, les institutions et la technologie

Une technologie n'a pas de valeur en soi, mais par rapport aux services qu'elle rend qui ne prennent de sens que s'il y a adéquation avec les caractéristiques du marché et de son environnement social. Une technologie séduisante et utile, comme le nucléaire, peut stagner si elle s'avère peu adaptable à ces caractéristiques.

La relance du nucléaire dans les économies industrialisées à l'instigation des gouvernements n'est pas concevable sans prendre acte de cette réalité pour tenter de la modifier à trois niveaux : compenser les défaillances du marché pour prendre en compte les avantages du nucléaire au regard de l'environnement, adapter l'environnement institutionnel à la technologie nucléaire, répondre aux objections vis-à-vis des techniques nucléaires actuelles par une innovation radicale.

- La première condition pour réinstaller le nucléaire dans le marché est d'internaliser plus avant les coûts environnementaux des autres moyens de production électrique, en particulier par l'instauration d'écotaxes ou de marché des permis

d'émissions à condition, bien entendu, de vérifier dans le même temps que l'ensemble des coûts externes imputables au nucléaire et en particulier à l'aval du cycle, sont correctement identifiés et pleinement pris en compte. Une valeur du carbone de 70-100 \$/t pourrait sur le papier restaurer la compétitivité du nucléaire aux Etats-Unis et en Allemagne. Mais il ne s'agit que d'une condition nécessaire. Elle doit s'accompagner de processus décisionnels ouverts qui permettent de désamorcer la symbolique négative du nucléaire, le passage en force n'étant plus possible. Des débats nationaux approfondis impliquant toutes les parties prenantes doivent parvenir à une rationalisation des choix par la comparaison du risque de changement climatique et des risques associés au nucléaire.

- La seconde condition est l'adaptation de l'environnement institutionnel à deux niveaux. Au niveau réglementaire, les procédures et les règlements doivent être simplifiés et rendus prévisibles afin de pouvoir stabiliser les techniques de réacteurs et rechercher les effets de série, comme cela a commencé à être fait aux Etats-Unis et en Allemagne pour suivre l'exemple réussi de la France. Au niveau des marchés électriques libéralisés, il s'agit de créer une niche permettant de sécuriser les nouveaux investissements en centrales nucléaires par des contrats de long terme garantissant prix et débouchés que les revendeurs d'électricité seraient obligés par

l'Etat de signer. (La différence avec le prix du marché serait financée par un fonds de compensation abondé par une charge d'intérêt général)⁴. Mais il faudra sans doute une volonté politique très forte pour instaurer un tel dispositif dans un contexte d'abondance énergétique.

- La troisième condition est l'exploration d'un nouveau système nucléaire qui réponde à l'essentiel des objections sociales et géopolitiques. Les réacteurs à eau légère LWR et leur cycle ont été développés dans le prolongement des techniques développées à des fins militaires (propulsion sous-marine, production de matières fissiles). Leur amélioration constante en termes de sûreté depuis vingt ans (notamment avec des éléments de sûreté passive) ne semble pas suffisante pour reconstituer la confiance des opinions publiques. Les constructeurs doivent chercher à développer, avec l'appui des gouvernements, une innovation radicale qui réponde aux critères suivants : un niveau de sûreté très supérieur à celui de la génération des réacteurs LWR avancés, la possibilité de limiter considérablement la quantité de déchets de vie longue (par exemple d'un facteur cent), une exposition limitée aux risques de prolifération, une utilisation potentiellement très efficace des ressources fissiles et une plus grande divisibilité pour être en adéquation avec les marchés électriques libéralisés. Les projets de systèmes hybrides couplant accé-

lérateur et réacteur sous-critique, dont celui bien connu de "l'Amplificateur d'Énergie" étudié depuis 1992 par l'équipe de C. Rubbia au CERN à Genève, donnent une idée de la voie qu'il faudrait emprunter en sollicitant des idées neuves et l'émergence de nouvelles équipes. Mais ils en montrent aussi les embûches.

Les délais et les dépenses de mise au point d'une nouvelle filière nucléaire (60 à 100 milliards de F) sont tels que les Etats devront développer les coopérations internationales entre constructeurs nucléaires autour d'un petit nombre de projets, justifiables par l'intérêt commun de préservation du climat.

Pour l'heure on est encore loin de telles considérations. Les Etats industrialisés n'ont pas encore pris la mesure des difficultés à respecter leurs engagements à stabiliser ou à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. De plus le risque d'effet de serre ne semble pas permettre à lui seul de restaurer l'acceptation sociale du nucléaire sans crise climatique. En effet, les enquêtes d'opinion aux Etats-Unis et en Allemagne montrent que les caractéristiques des attitudes des groupes sociaux les plus concernés par le changement climatique les amènent à s'opposer à l'énergie nucléaire. Ce serait donc une erreur fondamentale de considérer que l'internalisation probable des coûts des émissions de CO₂ permettrait de restaurer la via-

bilité économique du nucléaire et de le relancer sans changement radical des opinions.

Quelle politique nucléaire française ?

La situation internationale est donc lourde d'incertitudes, avec un développement prévisible des capacités nucléaires circonscrit seulement aux pays d'Asie de l'Est d'ici 2010-2015 avant une éventuelle reprise dans d'autres régions. Quid alors de la spécificité française et des choix nucléaires à venir? Tout en visant à préparer l'avenir au niveau national et international en contribuant à la réponse au défi climatique, les choix français doivent gagner en réalisme, en simplicité et en flexibilité pour tenir compte de l'environnement international déprimé et de son incertitude. Ils doivent également tenir compte d'un certain effacement de l'atypisme français, avec l'atténuation de l'isolement des choix de la scène politique, la création d'une autorité de sûreté indépendante et une libéralisation modérée du marché électrique.

L'émergence de contraintes économiques

Au plan économique, la libéralisation des marchés électriques en Europe, impulsée par une directive européenne de 1996, va affecter l'industrie électrique française. La loi de modernisation du service public de l'électricité, discutée

en février 1999 au Parlement, laissera à EDF un vaste marché protégé de 66 % des besoins nationaux. Mais rien ne garantit la stabilité du nouveau dispositif à l'avenir dans le jeu européen parce que la plupart des autres pays ouvre beaucoup plus largement leurs marchés électriques et que la directive doit être révisée en 2005. L'ouverture du marché électrique pourrait s'étendre et le secteur être réorganisé pour faciliter l'entrée de concurrents. Face à la concurrence potentielle d'autres opérateurs, EDF sera donc logiquement incitée à ajuster ses choix en fonction de critères de rentabilité. Certes, selon la nouvelle loi, le gouvernement gardera les moyens d'orientation des choix d'investissement en pouvant organiser hors marché le développement de nouvelles productions nucléaires. Mais l'ère des ingénieurs pourrait avoir vécu.

L'époque du monolithisme des choix énergétiques français semble aussi arriver à terme. Les leçons de la rigidité et de l'irréversibilité des choix antérieurs (la vulnérabilité de la production nationale à l'apparition de défauts génériques sur une série de réacteurs, le surdimensionnement du parc nucléaire de 10 à 15 réacteurs, le coûteux raté du prototype SuperPhénix et les errements de l'option retraitement-recyclage) commencent à être tirées. Vingt-cinq années après les grandes décisions justifiées par les prévisions les plus alarmistes, la situation énergétique

mondiale est radicalement différente de ce qui était prévue. Le prix du pétrole se situe autour de 10 \$ le baril alors que certains le voyaient en 2000 à 70-100 \$ le baril. Le gaz s'est affirmé comme une énergie importante. Les approvisionnements de la demande énergétique mondiale semblent déjà assurés pour les trente prochaines années grâce au progrès techniques des vingt dernières années.

La diversification de la production électrique s'effectuera en partie d'elle-même avec le développement de la production sur site industriel (du fait de la baisse des économies d'échelle) et la libéralisation électrique. Le jeu combiné de l'entrée de producteurs privés et de décisions d'EDF de renouvellement modéré de ses unités nucléaires devrait abaisser la part du nucléaire de 80 % actuellement à 60 % en 2020, part sur laquelle se retrouvent les acteurs dominants. Cette baisse reviendrait à limiter le nucléaire à la production en base.

Des tensions à résoudre entre objectifs de politique publique

Plusieurs options sont alors possibles pour structurer la politique électronucléaire future. Comme dans le passé, les impératifs de politique industrielle risquent de prédominer sur les critères de politique énergétique dans les choix futurs, en raison de la

capacité d'influence de l'industrie électronucléaire sur la politique gouvernementale. C'est là où il conviendrait d'en appeler à la sagesse d'un pouvoir qui, de gauche ou de droite, a toujours été sensible aux sirènes du nationalisme technologique et industriel, ce qui a souvent nui au réalisme.

En premier lieu, la relance des commandes françaises et l'enjeu du maintien de sa position de pointe sur le marché international des réacteurs justifieraient, semble-t-il, la mise au point d'un type amélioré de réacteur LWR, l'European Pressurized water Reactor (EPR). Ce choix pouvait sembler marqué du sceau du réalisme industriel et commercial : gain en sûreté et peut-être en économie, coopération franco-allemande qui ouvrirait sur le difficile marché d'outre-Rhin (jusqu'à la décision allemande actuelle de sortie du nucléaire), bon positionnement sur le créneau des réacteurs avancés où ABB et General Electric seront présents. Mais, après l'abandon allemand, la raison économique commande-t-elle vraiment un tel effort qui impliquerait la construction prochaine d'un prototype très coûteux de trente milliards de francs? A moyen et long terme, l'enjeu commercial est très limité : les acheteurs asiatiques de réacteurs qui représentent la partie active du marché exigent un transfert rapide de la technologie⁵. De plus, en France, alors qu'EDF

sera incité à rationaliser ses choix sous l'effet de la concurrence, l'EPR ne lui apportera aucun avantage compétitif avant la construction d'une dizaine d'unités, alors qu'elle était récemment passée à la technique N4 de réacteurs améliorés de 1 450 MW avec 4 exemplaires construits. Cette technique présente des défauts de jeunesse à corriger, mais elle n'a pas pu bénéficier encore d'effets de série et de standardisation. (EDF en est pour l'heure à demander de très importantes simplifications et le passage de la taille de l'EPR à 1 750 MW, en attendant de demander des aides pour payer un prototype forcément coûteux, ce qui illustre bien les exigences économiques de la technologie nucléaire).

En second lieu, l'incitation à limiter ses coûts invitera aussi le producteur électrique à se poser la question de l'intérêt de faire retraiter ses combustibles usés pour recycler le plutonium alors que six à dix milliards de francs par an sont dépensés par EDF pour payer ces deux activités⁶. On ne dit pas assez que la gestion des déchets peut s'effectuer dans des conditions aussi sûres, voire plus sûres sans retraitement. Pour l'heure, seuls 30 % des combustibles usés sont retraités dans le monde. Sans parler des choix allemands actuels, les doutes qui ont récemment conduit EDF à décider de ne plus retraiter tous ces combustibles devraient dans le futur, lors

du renouvellement de l'usine de la Hague, amener à sortir des doctrines rigides qui ont structuré il y a quarante ans les orientations technologiques en fonction de représentations énergétiques désormais surannées. L'intérêt national ne peut se réduire indéfiniment à celui d'une compagnie du combustible nucléaire, fut-elle dirigée par une élite très influente. Les intérêts corporatistes de la recherche nucléaire ne doivent pas non plus conduire à une sophistication extrêmement coûteuse de la fin de cycle, sous prétexte de sûreté et de réduction des volumes de déchets de vie longue.

Conclusion

Même si le nucléaire ne constitue qu'une des réponses possibles, c'est bien de la volonté de la communauté internationale de combattre réellement l'effet de serre que dépend l'avenir du nucléaire. Mais ce serait une erreur de considérer pour autant qu'il sera facile de relancer le nucléaire dans les pays industrialisés, notamment aux Etats-Unis qui auraient à jouer un rôle fondamental en ouvrant la voie. Certes l'internalisation de la valeur du carbone permettra de restaurer sur le papier la viabilité économique de l'électronucléaire avec l'appui de dispositifs de mise hors marché. Mais les processus politiques ne sont pas animés par la rationalité pure, quand des citoyens, des

consommateurs, des groupes aux valeurs et aux intérêts divergents sont parties prenantes dans des processus sociaux complexes et incertains. Le tout n'assure en rien que, dans le futur, le nucléaire sera repêché au test du marché, d'autant plus qu'un progrès technique foisonnant ouvre plusieurs opportunités concurrentes.

Dans une telle situation, le maintien de l'option nucléaire en France doit s'accompagner d'une désacralisation rapide, ce que ne réalise pas encore le pouvoir politique actuel. La situation internationale ne permet plus de rêver aux délices d'un quelconque leadership technologique et industriel. La réalité politique et économique du nucléaire mondial est trop négative. Les grands groupes industriels (Westinghouse, General Electric, Alstom...) sont en train de se désintéresser du nucléaire. Il n'y a plus de place pour les entêtements et les fables technologiques qui continuent de marquer les esprits, mais pour l'intelligence des situations. Cependant l'heure n'a pas encore sonné où le monde industrialisé pourrait redécouvrir le nucléaire, ce qui rend difficiles les choix français. En tant que puissance ayant pu préserver un dynamisme technologique en ce domaine, la France n'aurait-elle pas un rôle important à jouer en prenant l'initiative d'un projet international de redéfinition des bases de la technologie nucléaire qui permettrait de répondre au maximum

d'objections des opposants? A l'évidence, l'EPR, le surgénérateur rapide-sodium et les cycles au plutonium ne sont pas cette réponse. Le temps semble bien venu de le reconnaître. ■

- 1 Si on démantèle en parallèle 5 réacteurs dans quarante ans, et si on doit développer et gérer 2 stockages souterrains et plusieurs stockages en surface, une dépense annuelle allant jusqu'à une trentaine de milliards n'est pas une hypothèse à exclure. Ce montant est à peu près au niveau de ce que rapporterait une taxe sur le carbone de 70 \$/t pour une production électrique par unités à gaz de 660 TWh et par unité charbon de 360 TWh.
- 2 Il y a 48 exploitants de réacteurs nucléaires aux Etats-Unis.
- 3 Rapport de l'OCDE et l'Agence Internationale de l'Energie.
- 4 Ce type de dispositif a existé en Grande-Bretagne de 1990 à 1997 pour soutenir l'électronucléaire existant, après la libéralisation des marchés électriques.
- 5 Il faut savoir que le chiffre d'affaires français à l'exportation pour la construction de réacteurs est inférieur au milliard de francs par an. Une reprise limitée du marché mondial n'entraînerait pas de changement déterminant.
- 6 Dans les autres domaines industriels, on n'opère des recyclages de produit que si le produit recyclé est économique par rapport au produit normal. Le coût du kWh produit par un combustible MOx (en incluant le coût du retraitement) est très au-dessus du coût du kWh nucléaire sans retraitement (6 c/kWh).

La sortie du nucléaire en Allemagne, condition d'une véritable politique énergétique soutenable

Le scénario
"Tournant Énergétique
2020"
de l'Öko-Institut

Uwe Fritsche, Christof Timpe,
Coordinateurs Energie de l'Öko-Institut, Freiburg

Le corps de l'article suivant est paru pour la première fois en 1996, à l'occasion des 10 ans de la catastrophe de Tchernobyl. Il n'a rien perdu de son actualité. Au contraire, le scénario a servi de base aux négociations entre SPD et Verts sur la sortie du nucléaire en Allemagne suite aux élections législatives de 1998. L'introduction a été rédigée par les auteurs en février 1999 pour la parution dans ces Cahiers. Global Chance remercie WISE-Paris qui a assuré le contact avec l'Öko-Institut et réalisé la traduction.

GC

Introduction

Depuis octobre 1998, un gouvernement fédéral composé de Socio-Démocrates (SPD) et de Verts (Bündnis90/Die Grünen) est au pouvoir en Allemagne et a fixé dans un accord de coalition que la sortie du nucléaire devra être réglée "définitivement et irréversiblement" au cours de la présente période législative de quatre ans. Le délai dans lequel cette sortie du nucléaire devra avoir lieu est, bien sûr, controversé. La plus grande composante de la coalition gouvernementale, le SPD, avait déjà décidé peu après la catastrophe nucléaire de Tchernobyl en 1986 d'abandonner l'exploitation du nucléaire sous 10 ans en cas d'accession au pouvoir à Bonn. Les Grünen ont toujours revendiqué, face aux risques inhérents à cette technologie, une sortie immédiate, c'est-à-dire l'arrêt définitif des réacteurs en un an environ.

Les premiers mois de la nouvelle politique nucléaire de Bonn montrent que l'arrêt des centrales nucléaires ne se fera pas aussi vite que prévu. Car l'accord de coalition stipule aussi

que l'abandon du nucléaire doit se faire sans versement d'indemnités. Les exploitants insistent sur leurs autorisations d'exploitation à durée illimitée et ne veulent pas arrêter les réacteurs avant la fin de leur quarantième année d'exploitation. Ceci repousserait la sortie du nucléaire à la période de 2010 - 2040. Le gouvernement fédéral souhaite régler le conflit concernant les durées restantes d'exploitation des centrales nucléaires, si possible sur la base d'un consensus avec les exploitants et éviter le risque d'interminables procès concernant les dédommagements. Le ministre de l'environnement a dans ses tiroirs, seulement pour le cas d'urgence, un texte de loi sur la sortie du nucléaire.

On montre ci-dessous que, d'un point de vue technique, énergétique et économique, l'Allemagne pourrait effectivement arrêter toutes les centrales nucléaires en l'espace d'un an. Par un revirement ambitieux de la politique énergétique, intitulé "Tournant Énergétique" développé par l'Öko-Institut, les émissions du gaz à effet de serre CO₂ pourraient être réduites malgré le remplacement partiel des capacités nucléaires par des centrales thermiques classiques. Si, pour des raisons juridiques et politiques, la sortie du nucléaire est aujourd'hui introduite comme une procédure à plus long terme, ceci signifie que l'industrie de l'énergie et les consommateurs auront plus de temps pour s'adapter à une nouvelle politique avec une priorité pour les économies d'énergie, la cogénération et les énergies renouvelables. Par contre, il convient de noter que la poussée d'innovation pour la construction de centrales électriques modernes, notamment en cogénération efficace, sera d'autant plus faible que le moment de la sortie définitive sera retardé.

Le scénario "Tournant Énergétique 2020" de l'Öko-Institut

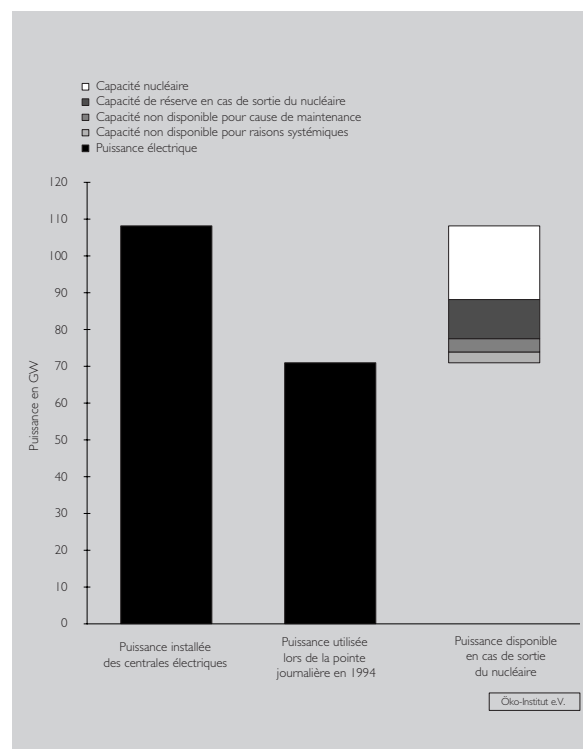
A l'occasion du dixième anniversaire de la catastrophe nucléaire de Tchernobyl, l'Öko-Institut a étendu son scénario "Tournant Énergétique" et analysé à nouveau la question de la sortie du nucléaire.¹

La sortie immédiate du nucléaire : la sécurité d'approvisionnement reste assurée

L'arrêt de tous les réacteurs est possible en moins d'un an, sans provoquer de problème d'approvisionnement en électricité :

A cause des surcapacités (cf. graphe 1), il y aurait une capacité de réserve d'environ 15 %, même après l'arrêt de tous les réacteurs. Ce bilan prend en compte toutes les conditions restrictives (par exemple les arrêts forcés pour maintenance). La sécurité d'approvisionnement est pleinement assurée dans le cas de la sortie immédiate du nucléaire.

Graphe 1 : Le bilan de capacité dans le cas d'une sortie du nucléaire en Allemagne



Le "Tournant Énergétique" : plus que la sortie du nucléaire...

Le scénario "Tournant Énergétique" analyse quelles sont les mesures qui, à côté de la sortie du nucléaire, soutiennent un Tournant Énergétique à moyen et à long terme.

Son cœur est **l'utilisation rationnelle de l'énergie** (par exemple isolation thermique, économie d'électricité). Dans tous les secteurs, des gisements d'économie largement supérieurs à ceux du scénario de référence peuvent être mobilisés et permettraient de baisser la consommation d'énergie finale d'ici l'année 2010 de 15 % et même de 25 % d'ici 2020 (par rapport à 1992). Un autre point important est le développement ciblé de la **cogénération** dans l'industrie, mais aussi dans les secteurs de l'habitat urbain et des services - à cet effet, de nouveaux systèmes de chauffage urbain seront construits et les systèmes existants seront étendus.

Un troisième point central est l'introduction poussée des **énergies renouvelables**, surtout pour la production d'électricité². La part des énergies renouvelables dans la production d'électricité peut ainsi être portée de 4 % en 1992 à 35 % en 2020. La contribution principale provient de l'énergie éolienne³ et de l'utilisation de la biomasse.

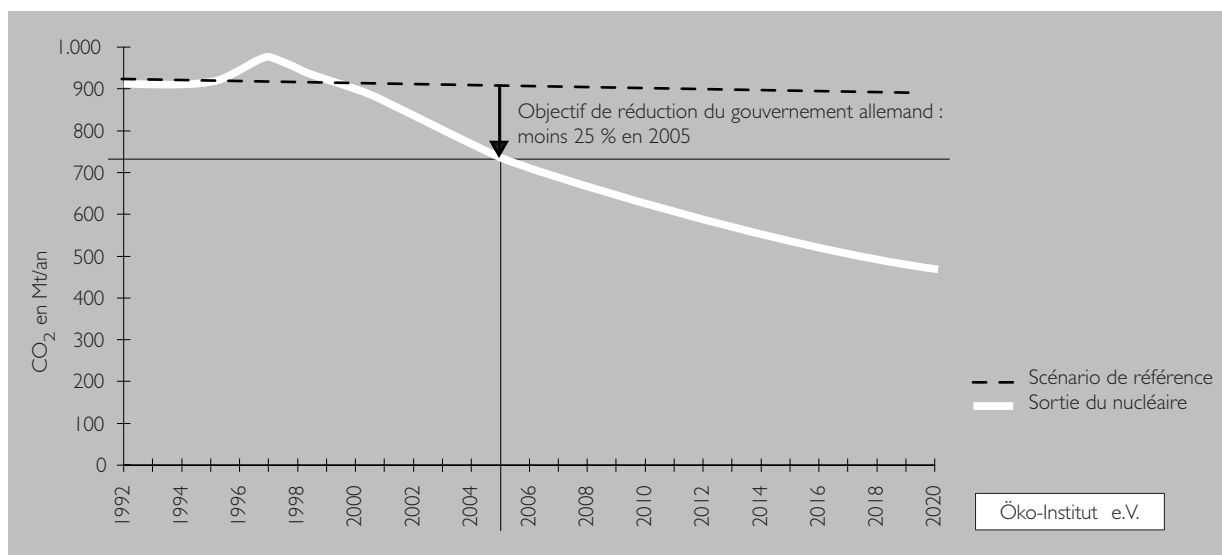
Dans le secteur des **transports**, l'offre des transports publics sera nettement élargie. La part des chemins de fer et des bus dans la capacité totale du trafic des voyageurs peut être augmentée jusqu'à 21 %. Pour les transports de marchandises, la part du rail augmente également. La consommation des voitures individuelles peut être réduite de façon draconienne.

Afin d'introduire un tel Tournant Energétique, une série d'outils de politique énergétique est disponible. Les plus importants sont l'introduction rapide d'une taxe efficace sur l'énergie, la réforme du cadre réglementaire de l'économie de l'énergie avec un point central dans la réglementation de l'industrie de l'énergie dans le sens d'une planification intégrée des ressources⁴, le soutien aux réseaux de chaleur, l'introduction de la réglementation de l'utilisation de la chaleur, des normes d'efficacité énergétique, etc.

Le scénario "Tournant Energétique" : principaux résultats

Le principal résultat du scénario Tournant Energétique actualisé montre que la sortie du nucléaire n'est pas seulement faisable techniquement. C'est en fait l'arrêt des centrales nucléaires qui permet un changement de direction vers un tournant énergétique qui rend la sortie du nucléaire également "maîtrisable" du point de vue des émissions de gaz à effet de serre. La restructuration du système énergétique conduit à une réduction draconienne des émissions de CO₂ qui correspond à environ 25 % jusqu'en 2005 et autour de 50 % jusqu'en 2020⁵.

Graphe 2 : Emissions de CO₂ dans le scénario "Tournant Energétique" en comparaison avec le scénario de référence du ministère fédéral de l'Economie



On reconnaît facilement dans le graphe ci-dessus la croissance passagère des émissions de CO₂ dans les années suivant la sortie immédiate du nucléaire. Par la transformation du parc des centrales électriques et les premiers résultats des économies, les émissions de CO₂, peuvent déjà être abaissées en dessous du développement figurant dans le scénario de référence quatre ans après la sortie du nucléaire. L'objectif de réduction fixé par le gouvernement fédéral sera atteint dès 2005. Ceci est également reflété dans le niveau et la structure des besoins en énergie primaire.

Restructurer l'industrie de l'énergie : les effets économiques

Une des conditions du tournant énergétique est la modification du comportement d'investissement dans les secteurs de la consommation finale d'énergie, de la production d'électricité et des réseaux de chaleur.

Pour atteindre une baisse des besoins en énergie finale, il faut un accroissement des dépenses dans les investissements en économie (isolation thermique, moteurs et systèmes d'éclairage plus efficaces, etc.). Celles-ci seront financées par la baisse des dépenses pour les sources d'énergie primaire (charbon, pétrole, électricité, etc.). Au total, plus de 860 milliards de DM [2.900 milliards

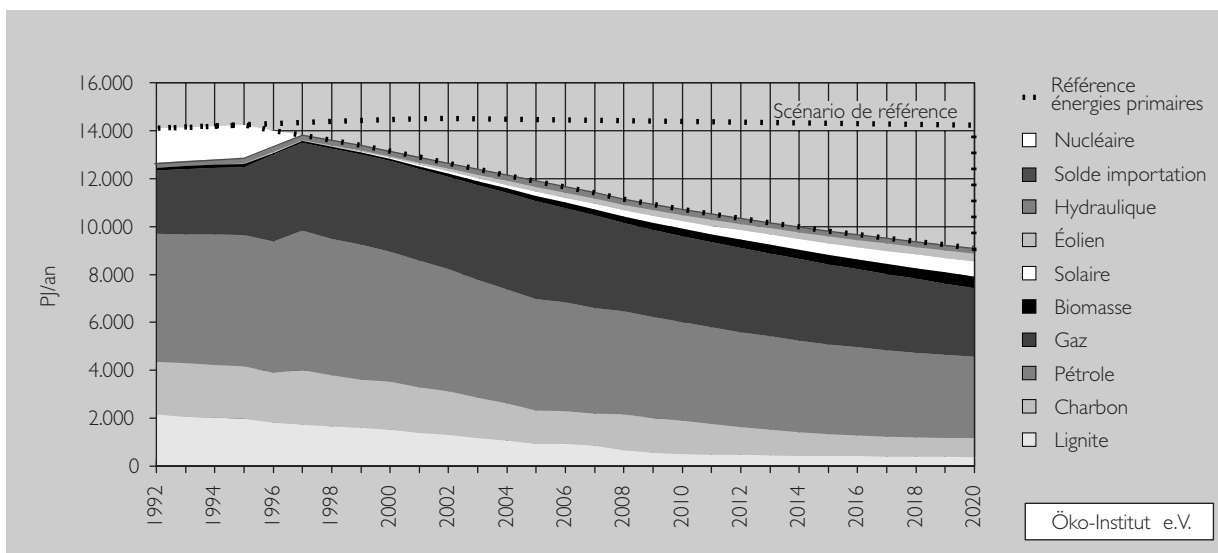
de francs] seront disponibles pour les investissements en économie d'énergie dans le secteur de la demande de l'énergie.

En outre, l'activité d'investissement se modifie dans le secteur de la production d'électricité et des réseaux de chaleur. Les investissements sont surtout dirigés vers la cogénération centralisée et décentralisée et les énergies renouvelables au lieu de servir au renouvellement des centrales nucléaires et thermiques classiques. Alors que la capacité installée nécessaire diminue de façon significative à cause de la baisse de la demande au cours de la période couverte par le scénario, les investissements pour la production d'électricité et les réseaux de chaleur ne baissent que de façon marginale. Ceci s'explique surtout par le développement accru de l'utilisation des énergies renouvelables.

Suite aux modifications survenant sur le parc de production, on assiste également à une modification des besoins en combustible pour la production d'électricité et l'approvisionnement des réseaux de chaleur. On a surtout recours au gaz naturel et à la biomasse, en remplacement de l'uranium et du charbon.

La réorientation des investissements et des dépenses pour les combustibles a un effet sur la répartition des emplois. Par le déplacement de

Graph 3 : Demande en énergie primaire selon le scénario du "Tournant Énergétique" en comparaison avec le scénario de référence



la demande des secteurs économiques intensifs en importation et en capitaux vers des secteurs économiques intensifs en emplois, on crée des emplois supplémentaires : le tournant énergétique conduit en l'an 2000 à au moins **200 000 emplois supplémentaires** comparés au scénario de référence.⁶

Ce sont non seulement plus d'emplois, mais aussi des emplois plus sûrs qui sont créés⁷, car :

- on soutient des technologies pour lesquelles ont été identifiés de grands potentiels de croissance (technologies d'économie et d'efficacité, énergies renouvelables);
- on remplace la demande de ressources (fossiles) par une demande de connaissance et de savoir faire sur les économies d'énergie. Ceci nécessite des services importants d'analyse et de planification (consultance, planification, gestion, contractualisation en matière d'énergie, etc.);
- on renforce la demande décentralisée. Les gisements d'économie d'énergie ainsi que les sources d'énergies renouvelables ne peuvent être exploités que horizontalement. Ceci soutient en particulier les entreprises et artisans locaux et favorise ainsi le maintien ou la création d'emplois, qui sont peu exposés à la compétition internationale.

Au delà du bilan de plus de 200 000 emplois supplémentaires, on trouve des ajustements structurels importants. L'impact est négatif surtout dans le cas des industries charbonnière et électrique.⁸ De l'autre côté, l'impact positif se trouve avant tout dans le secteur du bâtiment et de l'industrie des produits d'investissement (industrie métallurgique, machine outil, électrotechnique).

Malgré tout : sortir du nucléaire plus tard ?

Les effets d'un tournant énergétique sont positifs et convaincants - mais sont ils réalistes? Ne serait-il pas plus raisonnable d'attendre pour la sortie du nucléaire ou de l'étaler plus dans le temps? Les dix dernières années ont montré que :

- C'est seulement là où une sortie du nucléaire a réellement eu lieu, que l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables sont prises au sérieux. La réorientation n'a lieu qu'après une décision de sortie du nucléaire.⁹
- Ceux qui font de (bonnes) affaires avec la vente de l'énergie ne misent pas sur les économies d'énergie - même si celles-ci produisent autant de profit.

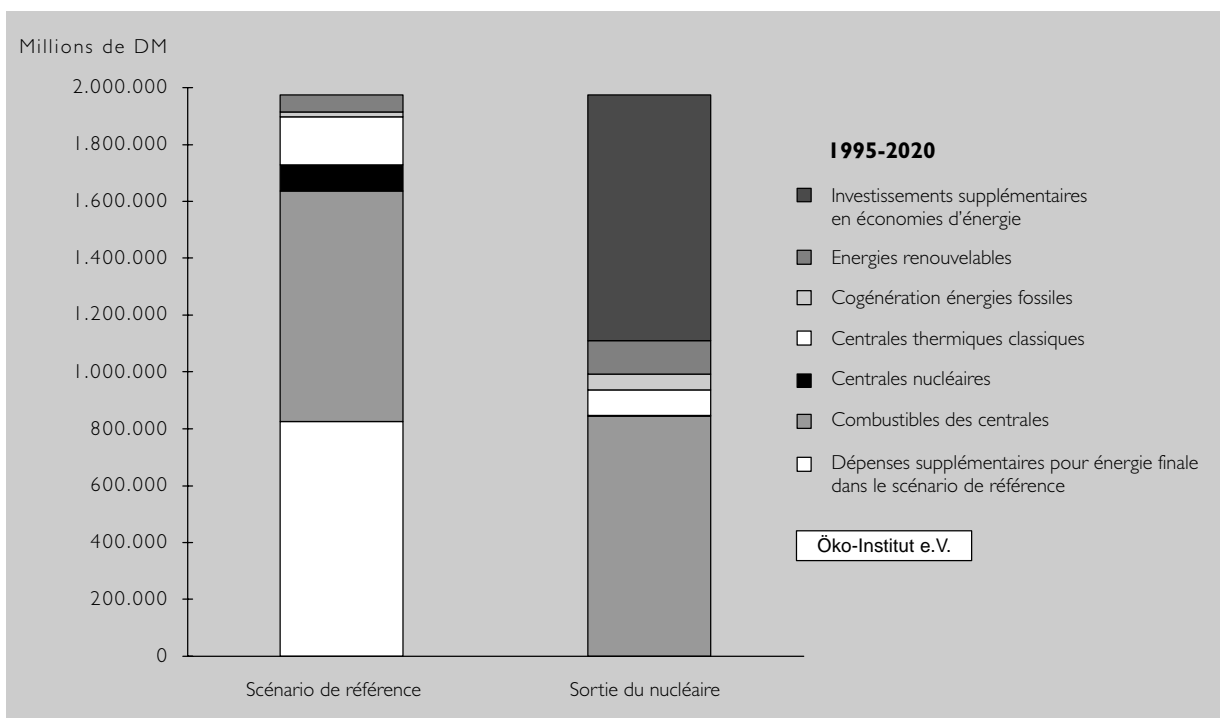
Cet effet de freinage de la politique nucléaire se voit de façon très évidente dans le scénario de référence du ministère de l'Economie. Malgré la poursuite de l'exploitation des centrales nucléaires existantes et l'investissement d'environ 100 milliards de DM [340 milliards de francs] dans de nouvelles centrales nucléaires, le bilan jusqu'à l'an 2020 est choquant - jusqu'à 2005 les émissions de CO₂ ne peuvent être réduites que d'environ 8 %, et de 11 % seulement d'ici 2020 (comparé à 1990). Ainsi, l'objectif du gouvernement fédéral de réduire les émissions de 25 % d'ici 2005 est clairement manqué et ne sera pas atteint même sur le long terme.

Le bilan en énergie primaire dans le scénario de référence est également médiocre : l'apport en énergies renouvelables dans ce scénario passe de façon marginale d'environ 3 % actuellement à moins de 4 % en 2020 - ceci ne correspond certainement pas à l'entrée dans un avenir énergétique soutenable.

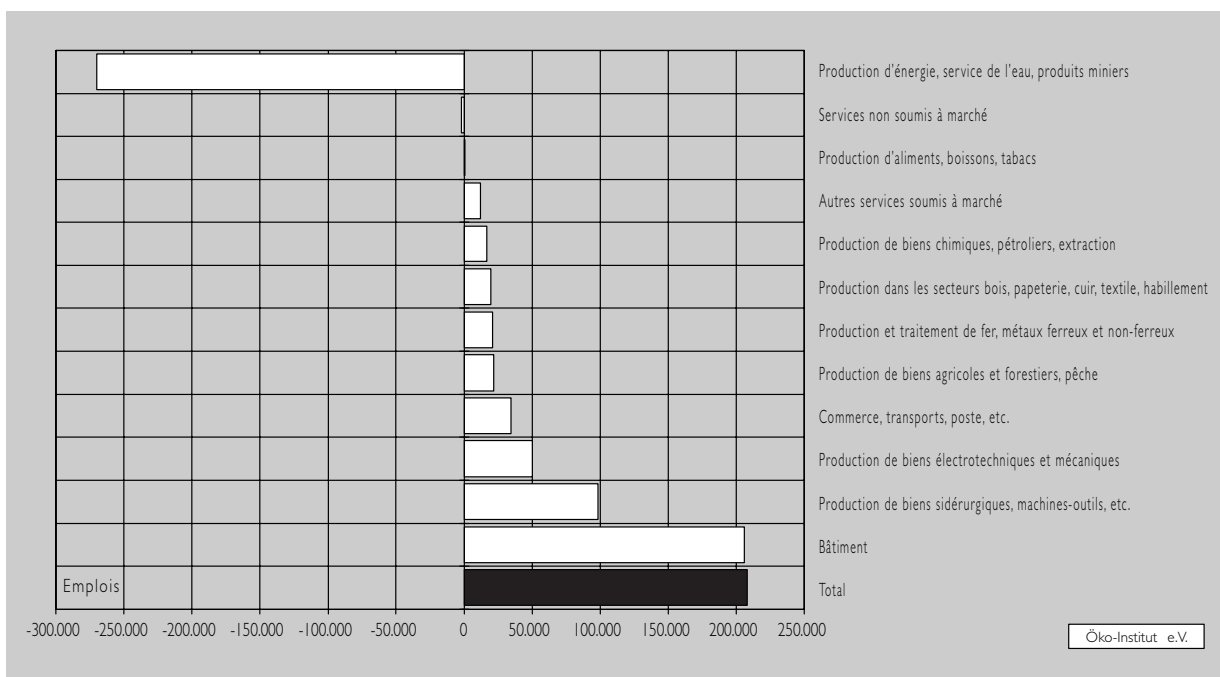
Conséquence : Seule la sortie du nucléaire conduit à l'entrée vers la protection du climat

Ce n'est qu'en sortant du nucléaire que l'on crée des alternatives, un ralentissement passif compromet la mise en place du volet protection de l'environnement de la sortie du nucléaire. La sortie du nucléaire retardée ou même son renoncement équivaut à manquer l'entrée dans une protection réelle du climat. Il est donc nécessaire de tirer les conséquences de plus de dix ans de discussions sur le nucléaire, d'appliquer la sortie immédiate et de trouver le consensus sur une politique éner-

Graphe 4 : Dépenses cumulées pour combustibles, investissement en centrales et en économie supplémentaires dans le scénario "Tournant Énergétique"



Graphe 5 : Effets sur l'emploi d'une sortie du nucléaire et du tournant énergétique en comparaison au développement de référence



gétique réellement porteuse d'avenir. Ceci concerne le niveau fédéral, les Länder et l'industrie de l'énergie.

Aussi les citoyennes et les citoyens sont-ils appelés à ne pas abandonner les politiques dans le processus de réorientation, et à faire progresser la transition par leur engagement. ■

- 1 Des résultats détaillés sont disponibles auprès de l'Öko-Institut. L'étude a été co-financée par le parti Bündnis90/Die Grünen (Groupe parlementaire du Bundestag et Groupe parlementaire du Landtag de Nord-Rhin-Westphalie) et la Fondation Heinrich-Böll.
- 2 La production actuelle d'électricité se fait actuellement à plus de 90 % dans des centrales à condensation avec des rendements de l'ordre de 40 %. Un kWh d'électricité sur la base d'énergies renouvelables peut ainsi économiser 2,5 kWh d'énergie fossile ou nucléaire.
- 3 N.D.L.R. : La capacité installée en énergie éolienne a été multipliée par cinq entre 1994 et 1998 pour passer de 632 MW à quelques 3 000 MW et la production éolienne a atteint environ 4,6 TWh en 1998. Dans un Land tel que le Schleswig-Holstein, l'énergie éolienne représente désormais environ 17 % dans la production de courant. L'industrie éolienne emploie désormais environ 15 000 personnes en Allemagne
- 4 cf. "Least-Cost-Planning als Regulierungsinstrument", U. Leprich, Öko-Institut, Freiburg 1994
- 5 La réduction est calculée sur la base des émissions de l'année 1990.
- 6 Les effets positifs d'une réforme fiscale écologique profond ne sont pas encore inclus dans ce chiffre.
- 7 cf. "Nachhaltige Energiewirtschaft - Einstieg in die Arbeitswelt von Morgen", Öko-Institut, Freiburg 1996. On y a effectué surtout l'analyse des effets qualitatifs d'une économie de l'énergie soutenable.
- 8 Pourtant, les effets dans l'industrie charbonnière ne pourront être affectés à la sortie du nucléaire que pour une petite partie. Car dans le cas d'une productivité constante, le nombre d'emplois dans le secteur charbonnier allemand baissera d'environ 150 000 en 1994 à environ 100 000 en 2020. Dans le cas d'une croissance prudente de la productivité de l'ordre de 1 % par an, le nombre d'emploi baisserait même à 70 000. L'origine en est surtout la montée de la part des importations [de charbon] : elle passe dans le scénario de référence de 17 % en 1992 à plus de 66 % en 2020.
- 9 cf. "NegaWatt", U. Leprich, Öko-Institut, Freiburg 1995

Les tendances du marché de la production d'électricité dans le monde

Samir Allal

La globalisation économique a favorisé une plus grande expression des mécanismes concurrentiels. Désormais la concurrence n'est plus uniquement locale ou nationale mais aussi globale. Cette libéralisation certes "timide" au cours des années 1980 s'est progressivement étendue à l'ensemble des biens et des services y compris l'électricité. De nouvelles conditions de marché sont en train d'émerger :

- développement de la production indépendante,
- apparition de nouveaux acteurs,

- participation d'entreprises privées locales ou internationales à la production d'électricité.

Actuellement, plusieurs pays cherchent à mettre en place des dispositifs institutionnels et législatifs adaptés afin de favoriser l'introduction de cette production indépendante et concessionnelle et d'attirer les investisseurs privés locaux et internationaux.

Cette transition des marchés électriques largement protégés vers des marchés ouverts et compétitifs permet une

profonde évolution des processus de décision en matière de production et de gestion de l'électricité. L'internationalisation de ces marchés et des entreprises électriques, le progrès technique favorisent l'émergence de la construction de centrales modulaires et à faible temps de retour d'investissement. Cela n'est pas sans poser quelques difficultés de financement, de choix technologiques, des problèmes d'équité, d'éthique et de gouvernance :

- A partir de quelles technologies la production d'électricité sera-t-elle assurée (gaz

naturel cycle-combiné, charbon propre, nucléaire, énergies renouvelables...)?

- Comment intégrer ces nouvelles préoccupations énergétiques et environnementales dans les décisions de choix d'infrastructures lourdes et comment financer ces nouvelles capacités de production?
- Comment prendre en compte au mieux l'intérêt collectif et comment prendre en compte cet intérêt au-delà d'une génération?

Un marché éclaté et fortement concurrentiel

Les investissements internationaux du marché électrique évalués à moins de 4 G\$ en 1991, atteignent en 1997, 70 G\$ soit 15 % des actifs totaux échangés dans le monde. Partout, on assiste à un véritable éclatement des systèmes électriques qui s'explique essentiellement par un souci d'une plus grande concurrence. Mais cette nouvelle situation fait apparaître de nouveaux problèmes auxquels doit répondre une régulation de plus en plus com-

plexe en fonction des degrés de libéralisation.

L'internationalisation des marchés et le progrès technique ont favorisé l'émergence de marchés de construction de centrales plus modulaires et diversifiées. Dans ce contexte, les économies d'échelle jouent très peu.

Pour faire face aux difficultés rencontrées dans la promotion des équipements lourds du fait du ralentissement de la croissance, des incertitudes de l'évolution de la demande d'électricité et de la montée des préoccupations environnementales, les investisseurs ont développé des turbines à gaz cycle-combiné qui apparaissent aujourd'hui comme une solution économique et relativement "écologique". En effet, cette technologie a connu au cours des dix dernières années des améliorations très importantes. Elle a bénéficié d'une vague d'innovation incrémentale. Ces avancées ont permis le développement des performances et une forte diminution des coûts d'investissement.

Le cycle combiné représente aujourd'hui la moitié des commandes mondiales de centrales électriques (35 GW par an installés) et génère un chiffre d'affaire d'environ 126 GF annuellement. Pour 4 GW installés par an, le chiffre d'affaire généré par le nucléaire est de seulement 44 GF soit moins de 35 % du chiffre d'affaire du gaz-cycle combiné. Entre 1990 et 1996, la construction de nouvelles centrales nucléaires ne représente qu'une faible part des nouvelles installations toutes filières confondues.

La libéralisation électrique reporte les risques sur les producteurs

L'évolution stoppée du nucléaire

Le très net ralentissement des programmes nucléaires dans le monde découle de cette réorganisation du secteur électrique, de la dérive des coûts d'investissement dans de nombreux pays, des incertitudes sur la demande et les prix de l'énergie mais aussi de l'accep-

Tableau 1 : Capacités installées dans le monde sur la période 1990-1996 et chiffre d'affaire des investissements électriques - Source : AIE, 1998

Filières	Capacités installées (GW)		Coût spécifique (F/kW)	Investissement sur 6 ans (GF)
	1990	1996		
Nucléaire	328	354	11 000	288
Hydraulique	647	709	10 000	690
Thermique	1 794	1 986	5 400	1 038
dont				
Charbon	-	1 048	6 600-10 200	-
Pétrole	-	363	5 400	-
Gaz	-	576	3 600-5 400	-
Total	2 769	3 049	-	2 016

tabilité sociale de cette technologie. En effet, la complexité du nucléaire et la taille des centrales limitent son adaptation dans un environnement en mutation.

La maîtrise de ses coûts s'est développée dans des systèmes électriques stables et des monopoles nationaux réglementés. Ce contexte permettait de faire supporter les coûts et les risques d'investissement et d'apprentissage de cette technologie complexe par les consommateurs. A l'inverse, la libéralisation électrique supprime la garantie des débouchés et permet de reporter les risques sur les producteurs.

Le choix d'investissement dans la construction de centrales est désormais fonction des seuls critères de rentabilité et de limitation des risques financiers qui sont plutôt défavorables au nucléaire. Les grands groupes industriels (Westinghouse, General Electric, Alstom...) sont en train de se désengager de ce marché. De ce fait, le développement du nucléaire est stoppé. Sur la base de 2016 GF d'investissements réalisés pour la construction de nouvelles centrales de 1990 à 1996, le nucléaire ne représente qu'une faible part soit 14 %.

L'émergence du cycle combiné et de la cogénération

La technologie cycle-combiné (154,2 GW dans le monde en 1995, UE-DG17) a connu des

améliorations successives grâce aux emprunts de l'industrie aéronautique. Le développement du gaz naturel pour la production de l'électricité est lié :

- aux avantages du cycle combiné du point de vue économique (meilleur rendement atteignant 60 % et faible coût d'investissement),
- aux qualités environnementales du gaz naturel : la combinaison de l'usage d'un combustible à moindre teneur en carbone et d'un rendement élevé permet de diminuer de moitié les émissions de CO₂ par kWh produit par rapport à une centrale conventionnelle charbon,
- aux prix relativement modérés du gaz naturel sur les différents marchés,
- à la flexibilité d'utilisation : il s'adapte mieux aux écarts prévisions-réalité du fait des délais de construction courts (2 ans pour une centrale cycle-combiné, contre 5 ans pour le charbon propre et 10 ans pour une tranche nucléaire).

Le gaz naturel-cycle combiné pour la génération de l'électricité est en train de se diffuser dans le monde pour toutes ces raisons (techniques, économiques) et la sensibilisation croissante des opinions publiques aux problèmes de l'environnement. L'implication croissante des investisseurs privés privilégie davantage les investissements dans ce type de centrales.

Parallèlement, pour la production décentralisée ou connectée au réseau, la cogénération-gaz naturel connaît un fort développement. Les États-Unis étaient les pionniers en matière de cogénération. Actuellement, de nouveaux pays "cogénérateurs" sont apparus. Ils appartiennent à l'Europe : Espagne, Italie, Grande-Bretagne et Belgique... Chaque pays a des spécificités pour favoriser un tel développement mais on retrouve les mêmes objectifs (amélioration de l'efficacité énergétique, réduction des émissions de CO₂ et autres gaz dommageables pour l'environnement, rentabilité économique avec des rendements situés entre 80 et 90 % et acceptabilité sociale).

Les capacités installées en cogénération ont quasi doublé dans tous les pays avec une croissance de 27 GW par an dont 200 à 400 MW en Europe et 135 GF par an. Faiblement capitalistique, la cogénération intéresse davantage les investisseurs privés. Ainsi, Suez-Lyonnaise des eaux, deuxième producteur d'électricité privé en Europe mise sur la cogénération à travers ses filiales Tractebel et Elyo (Le Monde 7/06/1997).

La promesse du charbon propre

Les nouvelles technologies des centrales à charbon offrent de réelles perspectives de développement. En effet, le mar-

ché des chaudières à lit fluidisé est particulièrement prometteur en raison de meilleurs rendements et de la faiblesse des émissions polluantes comparée aux chaudières classiques de charbon. En 1998, dix tranches de 100 MW (OECS, 1999) ont été mises en exploitation dans le monde pour un chiffre d'affaire de 10 GF. Actuellement, 27 tranches sont en commande. L'Inde projette la construction 6 chaudières au charbon. La Chine élabore quant à elle un programme d'une dizaine de projets de plus de 100 MW. L'amélioration des technologies gaz cycle-combiné est train de profiter aussi à la gazéification intégrée du charbon en cycle-combiné. Cette relance de la concurrence gaz-charbon notamment dans les grands pays producteurs de charbon peut leur permettre de valoriser leur immense réserve charbonnière.

Le cas des énergies renouvelables

Le marché des énergies renouvelables est à un tournant historique, en pleine

expansion, et partout encouragé par les Etats.

Ce marché est actuellement supérieur à 40 GF par an, hors grande hydraulique. Il devrait croître d'environ 2 GF par an, ordre de grandeur qui peut varier sensiblement en fonction de l'évolution des coûts de production des différentes énergies en compétition. En effet, malgré la baisse des coûts spécifiques des énergies renouvelables, celles-ci se heurtent aux techniques de génération à partir des énergies fossiles qui progressent également (grâce en particulier aux progrès du cycle-combiné) et dont les externalités négatives ne sont pas prises en compte.

A cette faible compétitivité des énergies renouvelables s'ajoutent les conséquences de la déréglementation du secteur électrique qui dans de nombreux pays a entraîné la remise en cause des obligations et conditions d'achat de l'électricité générées par les énergies renouvelables (les prix de rachat des énergies renouvelables se sont en général fortement dégra-

dés ces dernières années). Seules des garanties de reprise par le réseau de l'électricité à un prix convenable reflétant au moins les coûts évités à long terme et les coûts externes associés à la génération d'électricité d'origine fossile peuvent permettre un développement significatif des énergies renouvelables pour la production d'électricité.

La petite hydraulique est au premier rang de la génération d'électricité d'origine renouvelable dans le monde. Ainsi, la puissance installée au niveau mondial est de 35 GW. Le chiffre d'affaire mondial de la petite hydraulique est supérieur à 16 GF par an. Les perspectives de développement proposé par le livre blanc pour 2010 sont de 5 GW supplémentaires dans l'union européenne et le potentiel à développer au niveau mondial dépasse 100 GW.

Pour l'énergie éolienne, l'année 1998 a été fructueuse et surtout en Europe (plus de 5 GW cumulés). En effet, un nombre important d'aérogénérateurs a été installé en 1998 (9,6 GW

Tableau 2 : Capacités installées dans le monde pour les énergies renouvelables et chiffre d'affaire généré des investissements - Source : Atlas Project, Analysing energy technology strategy, ESD, DG 17, 1997

Filière	Capacités installées (GW)		Marché mondial 1995 (GF/an)	Marché mondial 2010 (GF/an)
	1995	2000		
Petite hydroélectricité	26,2	35	16,2	19
Bioélectricité	18	24	6,2	16,7
Eolien	6	11	7,9	11,5
Solaire	0,7	1,3	6,3	9,5
Géothermie	15	19,4	3	6,9
Biogaz	-	-	3,7	7,3
Total	65,9	90,3	43,3	70,9

cumulés dans le monde) et 30 000 emplois directs ont été créés dans l'industrie. Le marché mondial des éoliennes est estimé à près de 1,6 GW par an pour un chiffre d'affaire annuel de 10 GF. Les leaders mondiaux des éoliennes se trouvent au Danemark. Les seuls constructeurs danois auraient fabriqué 63 % du parc installé.

Pour le solaire, les capacités installées s'élèvent à 700 MW en 1995 (pour moitié centrales thermosolaires et installations photovoltaïques) pour un chiffre d'affaire d'environ 7 GF par an. Le marché mondial des modules photovoltaïque enregistre une croissance exceptionnelle en 1997 de 43 %. Le silicium cristallin représente 83 % de ce marché. La firme américaine Siemens Solar est numéro 1 avec 24 MW de modules produits en 1997, suivie de Kyocera (Japon) avec 15,4 MW.

Conclusion

L'amplification du mouvement de libéralisation du marché de l'électricité n'est pas sans géné-

rer des incertitudes, vecteurs de risques qui portent non seulement sur le marché mais aussi sur les technologies. Ces incertitudes concernent la conjoncture économique, l'évolution de la demande d'électricité, les grands pôles consommateurs - exportateurs mais aussi le coût et la disponibilité de ces technologies et leur acceptation sociale. Le choix entre le nucléaire, le cycle combiné, la cogénération et les autres énergies passe par une maîtrise sociale de ces risques. L'absence de dialogue social sur ces choix technologiques peut conduire l'économie et les acteurs industriels à des verrouillages technologiques.

Actuellement, les technologies électriques qui ont connu des baisses des coûts d'investissement dues à des progrès techniques rapides et des prix modérés des combustibles, peu contestées socialement, sont en train de gagner des parts de marché dans un contexte de réorganisation des systèmes électriques et d'abondance énergétique.

Sous réserve d'une étude plus détaillée, le tableau 3

résume la situation actuelle du marché mondial de la production d'électricité (ordres de grandeur). Il montre en particulier que les investissements réalisés dans le monde ces dix dernières années pour les centrales nucléaires sont loin derrière ceux des centrales à combustibles fossiles charbon et gaz.

Les technologies gaz naturel et énergies renouvelables se développent le plus rapidement. Les entreprises françaises et européennes, qu'il s'agisse des fabricants d'équipements, des bureaux d'ingénierie et des investisseurs, sont souvent bien placées pour conquérir ces nouvelles parts de marché (cycle combiné en Asie et en Méditerranée, petite hydraulique en Chine, électrification rurale décentralisée par systèmes photovoltaïque en Afrique). Toutefois, l'histoire industrielle nous enseigne qu'une condition essentielle de la conquête du marché extérieur passe par le développement d'un solide marché intérieur. Ceci renforce l'intérêt d'une diversification du parc national de production d'électricité. ■

Tableau 3 : Marché mondial actuel de la production d'électricité

Source : Estimation CNRS-Ecodev

Filière	Capacité annuelle installée (GW/an)	Investissements annuels (GF/an)
Gaz	35	126
Charbon	25	165
Pétrole	10	54
Hydraulique	10	100
Nucléaire	4	44
Renouvelables	5	43
Total	89	532

SOMMAIRES DES NUMÉROS PRÉCÉDENTS

N° 1 Décembre 92 **Pourquoi Global Chance** **L'effet de serre et la taxe** **sur le carbone** **Les réactions à l'appel** **de Heidelberg**

- ◆ Editorial : Pourquoi Global Chance? par B. Dessus
- ◆ Global Chance et l'effet de serre
- ◆ L'écotaxe, l'effet de serre et le développement, par B. Dessus (paru dans "Le Monde" du 25 Août 1992)
- ◆ Des taxes sur le carbone pour la prévention du risque climatique? Par O. Godard
- ◆ Les réactions de Global Chance à l'appel de Heidelberg :
 - Le texte de l'appel de Heidelberg
 - Les 264 premiers signataires de l'appel d'Heidelberg
 - Les nouveaux inquisiteurs (paru dans libération du 12 juin 1992)
 - Appel aux signataires de l'appel de Heidelberg (Global Chance et Groupe de Vézelay)
 - Appel à la raison pour une solidarité planétaire
 - La réaction des scientifiques présents à Rio
 - Rio contre Heidelberg, par M. Barrère (paru dans "Le Monde" du 17 Juin 1992)
 - L'après Rio : un défi pour les scientifiques, par M. Barrère
 - Diverses réactions en France (extraits)

N° 2 Juin 1993 **Global Chance et le nucléaire** **Ecologie, environnement** **et médias** **Science, progrès** **et développement**

- ◆ Editorial : Mettre sur la place publique une expertise multiple et contradictoire
- ◆ Courrier des lecteurs : lettre de P.H. Bourrelrier
- ◆ Global Chance et le nucléaire
- ◆ Débattre de l'avenir de l'énergie nucléaire
- ◆ Le programme électronucléaire français a-t-il tenu ses promesses? d'après un texte de J.P. Orfeuill
- ◆ Superphénix et la gestion du plutonium, par Jean-Paul Schapira (paru dans Le Monde du 14 avril 1993)
- ◆ Ecologie, environnement et médias
- ◆ Le risque d'un enfermement intellectuel
- ◆ Autour du livre de Luc Ferry "Le nouvel ordre écologique. L'arbre, l'animal et l'homme" (Grasset, 1992) :
 - Notes d'humeur, par J.C. Hourcade
 - Eléments de réflexion, par M. Chauvet
- ◆ Autour du livre de Y. Lenoir "La vérité sur l'effet de serre. Le dossier d'une manipulation planétaire" (La Découverte 1992) :
 - Résumé, par J.C. Ray
 - Vérité ou polémique? par R. Kandel (paru dans La Recherche, avril 1993)
 - Une vérité falsifiée, par O. Godard
- ◆ Autour du livre de P. Roqueplo "Climats sous surveillance. Limites et conditions de l'expertise scientifique" (Economica, 1993) :
 - Préface du livre
 - Climatologies sous surveillance, par R. Kandel
- ◆ Science, progrès et développement
- ◆ Bref compte-rendu de la journée du 8 mai organisée par l'AITEC, Conscience, Global Chance et le SNCS

N° 3 Mars 1994 **L'énergie en débat** **Nucléaire civil et prolifération** **Scénarios énergétiques et marges** **de liberté**

- ◆ Editorial : Global Chance fait école, par J.P. Orfeuill
- ◆ L'énergie en débat : Global Chance participe au colloque "Stratégies énergétiques, effet de serre et risque nucléaire" (Sénat, 8 au 10 avril)
- ◆ Nucléaire civil et prolifération, par Jean-Paul Schapira
- ◆ Comparer des scénarios énergétiques pour comprendre les marges de liberté, par Pierre Radanne
- ◆ Réponse d'Y. Lenoir à la critique de son livre "La vérité sur l'effet de serre. Le dossier d'une manipulation planétaire" (La Découverte 1992) publiée par O. Godard dans les Cahiers de Global Chance n°2

N° 4 Juin 1994 **Contributions au débat sur** **l'énergie** **Agriculture, forêts et** **développement durable**

- ◆ Editorial : Sans beaucoup d'illusion par Martine Barrère
- ◆ Contributions au débat national sur l'énergie :
 - "Fuel is beauty small" Assurer les besoins d'énergie de 11 milliards d'hommes sans détruire la planète, par Benjamin Dessus
 - Compte-rendu du colloque "Les stratégies énergétiques entre le risque nucléaire et l'effet de serre" (Sénat, 8 au 10 avril)
 - Mobilité et urbanisme : vers un péage urbain, par Yves Martin
 - Les enjeux de la mobilisation du bois énergie en France, par Carine Barbier et Pierre Radanne
 - Point de vue : une stratégie énergétique de moindre coût pour l'Europe, par Florentin Krause
 - Tchernobyl : halte au chantage article de Benjamin Dessus paru dans le Monde du 17 mai 1994
- ◆ Agriculture, forêts et développement durable :
 - La bioénergie, une composante essentielle du développement planétaire durable? par Arthur Riedacker

N° 5 Avril 1995 **Si l'on parlait climat?** **Le débat national énergie &** **environnement** **Les conditions d'une transition vers** **un développement durable**

- ◆ Editorial : Si l'on parlait climat? (Global Chance)
- ◆ Lettre au Premier Ministre pour une réelle mise en œuvre de la convention sur le risque de changement climatique
- ◆ Réponse du Premier Ministre
- ◆ Le débat national énergie et environnement
- ◆ Une simple façade? par Martine Barrère
- ◆ Un réel dialogue; analyse du débat national sur l'énergie, par Pierre Radanne
- ◆ Un rapport controversé; quelques commentaires sur le rapport Souviron, par Michel Mousel

- ◆ Les conditions d'une transition vers un développement durable
- Scénarios alternatifs et statut de l'environnement
- L'environnement contre le développement? par Benjamin Dessus
- Brèves réflexions sur l'internalisation des coûts d'environnement, par Philippe Roqueplo
- Les stratégies des entreprises et l'environnement planétaire, par Arthur Riedacker
- De l'acceptabilité d'une transition dans les transports, par Jean-Pierre Orfeuill

N° 6 Février 1996 **Numéro spécial en hommage à** **Martine Barrère**

- ◆ Editorial, par Catherine Allais et Benjamin Dessus
- La passion d'une journaliste scientifique, par Jean-François Augereau
- Chercheurs et citoyens
- Quelle raison partager? par Martine Barrère
- « Une femme de devoir et de caractère », par Hubert Curien
- Science et conscience, par Thierry Montmerle
- Spécialistes, politiques, citoyens : un débat insuffisant, par Yves Farges
- ◆ Science, patrimoine commun
- L'après Rio, par Serge Antoine
- Pour une science au service de l'humanité, par Léopold Messan Gnininvi
- Une européenne convaincue, par Michel André
- Anticiper les enjeux de la recherche, par Pierre Papon
- ◆ Risques et débat démocratique
- Nucléaire : organiser l'expertise, organiser le débat par Bernard Laponche
- Les choix très solitaires de l'industrie nucléaire, par Jean-Pierre Morichaud
- Comment prévoir les tremblements de terre? par Martine Barrère et Seiya Uyeda
- ◆ Profession journaliste
- L'affaire de la Soufrière, par Jean-Christophe Sabroux
- Partager le savoir, par Denise Devèze Berthet
- Bataille pour une salle d'actualité, par Pierre Virolleaud
- « Science et politique » : une rubrique à son image, par Dominique Chouchan

N°7 Juillet 1996 **Effet de serre : les experts ont-ils** **changé d'avis?** **Rapports résumés du Groupe** **Intergouvernemental sur l'Evolution du** **Climat Commentaires et analyses**

- ◆ Editorial, par Benjamin Dessus
- ◆ Un comité d'experts "intergouvernemental"
- Le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution des Climats, par A.Riedacker
- ◆ Etat des connaissances scientifiques

- Y a-t-il des éléments nouveaux dans le rapport rédigé par le Groupe I de l'IPCC?
interview de Jean Jouzel par Philippe Roqueplo
- Aspects scientifiques de l'évolution du climat, Résumé à l'intention des décideurs, Groupe de travail I du GIEC
- ◆ Conséquences de l'évolution du climat
- Le groupe II et les propositions pour le long terme,
Interview d'Arthur Riedacker par Benjamin Dessus
- Analyse scientifique et technique des incidences de l'évolution du climat, adaptation et atténuation, Résumé à l'attention des décideurs, Groupe de travail II du GIEC.
- ◆ Aspects socio-économiques
- Consensus inespéré ou artefact rhétorique?
par Jean-Charles Hourcade
- Aspects socio-économiques de l'évolution du climat
Résumé à l'attention des décideurs, Groupe de travail III du GIEC.
- ◆ Résumé officiel
- Synthèse du deuxième rapport d'évaluation du GIEC

N° 8 Juillet 1997 Développement durable et solidarité

- ◆ Editorial, par Benjamin Dessus
- ◆ Développement durable et solidarité
Global Chance
- ◆ Vous avez dit développement?
Global Chance
- ◆ Des copies inégales
Jean-Pierre Orfeuill
- ◆ Développement soutenable, développements et gestions durables : des solidarités à géométrie variable
Arthur Riedacker
- ◆ Développement durable et solidarité internationale,
quelle perspective pour l'Afrique?
Youba Sokona
- ◆ Compte rendu de la réunion 4D :
développement durable et coopération technique
- ◆ Le nerf de la solidarité :
le rôle des mécanismes financiers spécialisés (FEM et FFEM) Pierre Cornut, Benjamin Dessus

- ◆ Petit historique de la convention climat
Pierre Cornut
- ◆ Négociations climat :
engagements de réduction des émissions et solidarité
M. Colombier , B. Dessus, B. Laponche

N° 9 Novembre 1997 De Rio à Kyoto La négociation Climat

- ◆ Points de vue
- Un entretien avec Pierre Chemillier
- La négociation sur l'effet de serre, par Christian Brodhag
- Kyoto, ça passe ou ça casse, par Antoine Bonduelle
- La conférence de Kyoto et la prévention des risques climatiques, un point de vue d'économistes
- ◆ Des éléments pour le débat
- Risques climatiques et développement durable, par Benjamin Dessus
- Convention sur le climat : les permis négociables sont-ils politiquement incorrects ? par Olivier Godard
- Ecotaxes et permis d'émissions négociables : jeux de miroirs déformants, par Jean-Charles Hourcade
- Un instrument de flexibilité controversé : l'application conjointe, par Pierre Cornut
- Application conjointe : les premières leçons de la phase pilote, par Philippe Ménanteau

N° 10 Mars 1998 Le climat, risque majeur et enjeu politique - De la conférence de Kyoto à celle de Buenos Aires

Coédité avec le Courrier de la Planète

- ◆ Éditorial, par Laurence Tubiana et Benjamin Dessus
- ◆ Le bilan de Kyoto
- Engagements fermes, entretien avec Benjamin Dessus, Alain Lipietz et Michel Colombier
- Un marchandage planétaire, par Michel Mousel

- Une science moins contestée, par Sybille van den Hove
- L'improbable gendarme mondial, par Henri Lamotte
- La mobilisation continue, par Delia Villagrana
- Les lobbies perdent un round, par Yves Leers
- ◆ Positions
- Union européenne. Transformer l'essai, entretien avec Jim Currie
- Etats-Unis. Ratification sous conditions, par Michael Toman
- Des dollars plus verts, entretien avec François Falloux
- ◆ Permis négociables
- Le grand flou, par Jean-Charles Hourcade
- Etats-Unis. Un marché qui sent le soufre, par Fiona Mullins
- Chacun peut y gagner, par Graciela Chichilnisky
- Du vent à revendre, par Zbigniew Karaczun
- Equité ou loi du plus fort ? par Anil Agarwal
- ◆ Rapports Nord-Sud
- Réinventer la solidarité, par Benjamin Dessus et Michel Colombier
- Le tiers-monde fait fausse route, par José Goldemberg
- Costa Rica. Gare aux chèques en bois, par Jean Labrousse
- ◆ Politiques et mesures
- L'environnement, levier du développement, par Benjamin Dessus
- La fin d'un règne ? par Mycle Schneider
- Des efforts bien modestes, par Antoine Bonduelle
- Organiser l'espace, par Walter Hook
- Villes en campagne, par Virginia Sonntag-O'Brien
- L'écologie, c'est rentable, par Antoine de Ravignan
- Les Trois Suisses : créneau vert, entretien avec Rémi Souchon
- Régime sec, par Jean-François Soussana
- ◆ Repères
- Le B.A. - BA de l'effet de serre
- Les risques du réchauffement
- Le climat, bien commun de l'humanité ?
- Des moyens d'action
- Bibliographie

Les cahiers de Global Chance	
2 numéros par an	
NOM.....	ORGANISME.....
ADRESSE.....	Code postal.....Commune.....
o Abonnement individuel :	130 F
o Abonnement de soutien individuel :	250 F
o Abonnement d'institutions et d'organismes :	500 F
o Ci-joint un chèque à l'ordre de l'Association Global Chance	
o A facturer	
TOTAL.....F	Date..... Signature.....
<i>Association Global Chance, 41 rue Rouget de Lisle, 92150 Suresnes</i>	

L'association GLOBAL CHANCE

GLOBAL CHANCE est une association de scientifiques qui s'est donné pour objectif de tirer parti de la prise de conscience des menaces qui pèsent sur l'environnement global ("global change") pour promouvoir les chances d'un développement mondial équilibré.

La situation actuelle comporte des risques de voir se développer des comportements contraires à cet objectif :

- comportement fataliste, privilégiant le développement de la consommation sans prendre en compte l'environnement,
- comportement d'exclusion des pays du Sud du développement pour préserver le mode de vie occidental,
- comportement d'intégrisme écologique, sacrifiant l'homme à la nature,
- comportement de fuite en avant technologique porteuse de nouvelles nuisances et de nature à renforcer les rapports de domination Nord-Sud.

Mais la prise de conscience de ces menaces sur l'environnement global peut aussi fournir la chance d'impulser de nouvelles solidarités et de nouvelles actions pour un développement durable.

Pour GLOBAL CHANCE, un tel développement suppose :

- Le développement réel de l'ensemble des pays du monde dans une perspective humaniste,
- Le choix d'une méthode démocratique comme principe supérieur d'action,
- Le retour à un équilibre avec la nature, certes différent de celui que nous connaissons aujourd'hui, mais qui n'apparaisse pas comme incompatible avec le développement humain. Ce retour à l'équilibre prendra du temps. Mais après une phase transitoire d'adaptation une telle condition implique de tendre :
 - vers des prélèvements globaux mineurs et décroissants de ressources non renouvelables,
 - vers des rejets nuls ou mineurs d'éléments non recyclables (sur des durées de l'ordre de quelques générations) dans les processus de la nature.

Après discussion interne au sein de l'association, GLOBAL CHANCE se propose de mettre les compétences scientifiques de ses membres au service :

- d'une expertise publique multiple et contradictoire,
- de l'identification et de la promotion de réponses collectives nouvelles et positives aux menaces de changement global,

dans les domaines scientifique et technique, économique et financier, politique et réglementaire, social et culturel, dans un esprit de solidarité Nord Sud, d'humanisme et de démocratie.