

Effet de serre et nucléaire

L'équilibre de précautions

Benjamin Dessus, Yves Marignac

Les travaux de la Commission Energie 2010–2020 du Plan ont bien mis en exergue quatre risques de nature "globale"¹ auxquels l'humanité se trouvera confrontée au siècle prochain du fait du développement plus ou moins bien contrôlé de ses systèmes énergétiques :

- les risques d'épuisement ou de raréfaction des énergies fossiles, le charbon, le pétrole, le gaz naturel,
- les risques de réchauffement du climat associé à l'usage intensif des énergies fossiles,
- les risques nucléaires civils et militaires (accidents, transport et stockage des déchets, risques de prolifération),
- les risques enfin de concurrence d'usage des sols qu'entraînerait un usage trop

intense de terres cultivables à des fins de production d'énergie.

Ces risques ne sont pas indépendants les uns des autres; par exemple, pour lutter contre le réchauffement du climat, on peut envisager de réduire le recours aux énergies fossiles. On repousse alors l'échéance de l'épuisement des ressources en même temps qu'on ralentit les émissions de gaz à effet de serre responsables du réchauffement. Mais si, pour faire face aux besoins, on augmente considérablement le recours à l'énergie nucléaire ou aux énergies renouvelables, on renforce d'autant les risques associés à l'énergie nucléaire ou aux concurrences d'usage des sols. Il est donc indispensable, pour définir une stratégie énergétique au service d'un dévelop-

pement durable, de garder en tête cette imbrication des risques du moyen et du long terme.

Cette remarque semble tout particulièrement fondée dans la période actuelle, marquée par la prise de conscience récente, au niveau international, des problèmes d'effet de serre. La crainte du réchauffement climatique pourrait en effet, à première vue, favoriser le nucléaire dont les émissions de gaz à effet de serre sont plus faibles². Ainsi, le recours au nucléaire est parfois présenté aujourd'hui comme un instrument majeur de lutte contre l'effet de serre – et le débat se développe au plan international sur la légitimité et sur l'efficacité de cette idée (par exemple sur la question de la prise en compte ou non de

programmes nucléaires dans les mécanismes de flexibilité). Quoiqu'il en soit, les tentatives de précaution vis-à-vis du risque climatique ne doivent pas se traduire par un transfert vers d'autres risques. En d'autres termes, cet examen de la place du nucléaire dans la problématique de lutte contre l'effet de serre ne peut être mené sans une interrogation préalable sur la mise en place d'une précaution de même nature vis-à-vis des risques de long terme liés à l'industrie nucléaire, en particulier à ses déchets.

La période récente a vu s'intensifier les discussions internationales pour parvenir à une précaution commune sur le réchauffement climatique. La négociation de Kyoto a marqué un premier pas important puisque les pays industrialisés se sont engagés à une réduction de 5,2% de leurs émissions en 2010 par rapport à 1990 (même si cela apparaît encore comme bien timide) alors que la tendance serait plutôt à une croissance de l'ordre de 10 à 15% à cette époque.

Il est instructif de voir que dans ce cas, la communauté internationale n'a pas attendu une description précise et argumentée financièrement des dégâts du réchauffement pour appliquer un principe de précaution élémentaire qui consiste à dire qu'en attendant d'en savoir plus sur la nocivité des émissions, il est prudent d'en contrôler au mieux l'augmentation. D'où cet engagement

mondial qui s'est traduit par des engagements quantitatifs des uns et des autres et la discussion de mécanismes de flexibilité.

Force est de constater que rien ne vient jusqu'ici équilibrer ces avancées en ce qui concerne les risques associés au nucléaire, en particulier celui du cumul plus ou moins bien contrôlé de masses de plus en plus importantes de matières hautement radioactives à vie longue qui resteront nocives pendant des centaines, des milliers ou des centaines de milliers d'années. Bien que d'autres facteurs économiques jouent actuellement en défaveur du nucléaire, le risque existe que la limitation imposée aux émissions de carbone provoque, par un effet de vases communicants, un appel d'air pour cette industrie, qui gonflerait sans précaution les stocks de déchets radioactifs les plus dangereux.

Comment se prémunir d'un tel effet pervers ? Pourquoi ne pas s'inspirer des mesures adoptées pour contrôler l'augmentation des émissions de carbone ?

Le Club "Energie, prospective et débats"³ du Commissariat Général au Plan s'est penché sur cette question. Peut-on raisonner de façon analogue sur les précautions à prendre vis-à-vis de l'épuisement des ressources fossiles, vis-à-vis de l'accumulation trop rapide de gaz à effets de serre dans l'atmosphère, vis-à-vis du cumul des déchets nucléaires à radioactivité élevée et très longue durée de vie (supérieure au millier d'années) ?

Le principe de précaution appliqué au climat

Dans le cas de l'effet de serre que fait-on ?

Pour engager des actions d'atténuation du changement climatique plusieurs pistes se présentent :

► Une méthode "coûts avantages" qui consiste à recenser et évaluer d'une part les dégâts associés au réchauffement engendré par les émissions et d'autre part les actions possibles de réduction de ces mêmes émissions. La comparaison des coûts marginaux des dommages et des réductions d'émission permet de trouver le point d'équilibre économique, "la valeur du carbone" qui assure un intérêt aux mesures à prendre. Pour cette valeur du carbone le coût de la mesure est égal au coût du dommage évité. De nombreuses tentatives d'évaluation ont été faites dans ce sens. Elles se sont heurtées à d'énormes difficultés du fait de la très grande incertitude qui règne à la fois sur la nature, l'ampleur, la chronologie, la distribution géographique et sectorielle des dégâts.

► Une méthode "coût efficacité" qui vise plus modestement à minimiser le coût des mesures à adopter pour atteindre un objectif donné de réduction des émissions.

Dans ce cas il n'est plus nécessaire de nommer les dégâts, leur ampleur et le coût de leur réparation. On s'intéresse par contre aux causes, aux responsables (les différents gaz à effet de serre) et l'on cherche

à minimiser les coûts de réduction des émissions pour un objectif donné. La valeur du carbone obtenue correspond alors au coût marginal de dépollution (ici de réduction des émissions) et n'est plus liée à celui des dommages. C'est dire qu'on admet être incapable dans un premier temps de chiffrer précisément l'ampleur des mesures à prendre, mais que cela n'empêche pas de commencer à agir.

D'où l'idée de répartir, entre les différents pays du monde, des quotas d'émission, ou de créer des taxes qui reviennent toutes à attribuer à un moment donné une valeur monétaire à l'émission d'une tonne de plus de carbone dans l'atmosphère. Si l'on décide de fixer une taxe de 20 \$ par tonne de carbone, un industriel émetteur aura intérêt à faire tous les investissements qui lui permettront d'économiser une tonne de carbone pour moins de 20 \$. Si l'on se fixe des quotas et un système d'échange des permis d'émettre, le même industriel, limité dans son expansion par l'augmentation de ses émissions, essaiera de se procurer sur le marché national ou international des permis d'émettre inutilisés par ses voisins.

Tout cela conduit finalement à une "valeur normative du carbone", qui pourrait être définie à une époque donnée comme la valeur monétaire nécessaire pour dissuader un émetteur de

carbone d'émettre une tonne de carbone ou, si l'on préfère, le prix que la communauté internationale est prête à payer pour éviter l'émission d'une tonne de carbone supplémentaire.

Principe de précaution et déchets nucléaires

Peut-on utiliser la même méthode d'approche pour le nucléaire et ses déchets ? C'est la question qu'a essayé d'aborder le Club Energie, prospective et débats.

Il faut tout d'abord situer la question qui nous préoccupe - les flux et les stocks de déchets à vie longue - dans le contexte plus large des risques associés au nucléaire. La production d'électricité d'origine nucléaire présente des risques spécifiques, liés à la radioactivité des matières qu'elle consomme et qu'elle génère, essentiellement de trois sortes :

- les risques d'exposition de personnes ou de contamination de l'environnement liés à l'exploitation (en situation accidentelle bien sûr, mais aussi en fonctionnement normal);
- les risques liés aux déchets radioactifs de diverses sortes produits par l'industrie nucléaire;
- enfin, les risques de prolifération associés à l'utilisation possible de matières utilisées par le nucléaire civil pour des usages militaires.

La probabilité d'un accident majeur sur un réacteur, semblable à l'accident de Tchernobyl, n'est pas nulle, même si la conception des

réacteurs progresse régulièrement du point de vue de la sûreté. De plus, le récent accident de Tokai-Mura, au Japon, est venu nous rappeler que des accidents graves pouvaient surtout se produire dans les installations du cycle du combustible. Mais ces usines de transformation des matières entrant dans la composition du combustible neuf ou usé ne représentent pas seulement un risque d'exposition accidentelle. Elles constituent également, en particulier celles qui manipulent le plutonium, une source importante de l'exposition "normale" des travailleurs du nucléaire.

Les déchets nucléaires sont extrêmement divers. On les regroupe en catégories selon leur durée de vie (calculée en fonction de la décroissance de la radioactivité des matières qu'ils renferment) et leur niveau de radioactivité (en fonction du type de rayonnements, α , β ou γ qu'ils émettent et de leur intensité). On distingue ainsi des déchets à vie courte ou longue selon que leur période est inférieure ou supérieure à trente années, et des déchets très faiblement, faiblement, moyennement et hautement radioactifs. L'industrie nucléaire produit cinq catégories principales de déchets⁴, dont une seule fait à l'heure actuelle en France l'objet d'un stockage définitif (les déchets faiblement et moyennement actifs à vie courte, stockés en surface). Les autres déchets sont entreposés en attendant que les installations pour leur stockage soient construites ou

même, dans certains cas, que leur principe soit arrêté. C'est notamment le cas des déchets les plus radioactifs et des déchets à vie longue, qui constituent la préoccupation majeure des chercheurs, des décideurs et des citoyens.

Le risque principal, vis-à-vis des déchets, est en effet celui lié à la gestion des déchets issus du combustible, à cause du plutonium, des actinides mineurs et des produits de fission à vie longue qu'il contient. Ces déchets sont de différentes natures, et sont produits en quantités variables, selon la stratégie adoptée pour la gestion du cycle du combustible.

Quelle stratégie de stockage ?

Le problème de ces déchets hautement radioactifs à vie longue est d'ailleurs au cœur du débat sur la meilleure stratégie industrielle, qui voit s'affronter deux conceptions opposées :

Le stockage direct, pratiqué aux États-Unis et dans la plupart des pays concernés, revient à considérer le combustible irradié, dès sa sortie du réacteur, comme un déchet. Il est alors entreposé quelques dizaines d'années (pour laisser retomber son dégagement thermique) puis - en théorie, puisque le site correspondant n'existe pas encore - stocké définitivement dans un site en profondeur.

Ainsi, l'ensemble des matières contenues dans le combustible usé, et notamment l'uranium, le

plutonium, les actinides mineurs et les produits de fission, ne font l'objet d'aucun traitement séparé.

- Le retraitement-recyclage, pratiqué en France et dans quelques autres pays, consiste au contraire à opérer une gestion séparée, avec différentes finalités. D'une part, les matières énergétiques que sont l'uranium et surtout le plutonium sont séparées en vue d'une réutilisation (dans la fabrication de combustible neuf).

D'autre part, les matières restantes, dont les actinides mineurs et les produits de fission, sont enfermées dans une matrice en verre (déchets vitrifiés) en vue d'un stockage définitif (probablement en profondeur, bien que cette solution n'ait pas été arrêtée et que le stockage en sub-surface soit également examiné). Sur le papier, cette solution a le grand mérite de sortir le plutonium de la gestion des déchets en le recyclant indéfiniment.

Le refus de stockage de déchets contenant du plutonium, l'un des éléments les plus radio-toxiques, les plus longs à disparaître et les plus difficiles à stocker, est d'ailleurs en théorie un principe de base de la stratégie française. Dans la réalité, la gestion du retraitement-recyclage est plus complexe. D'une part, réaliser l'équilibre entre les quantités de plutonium retraitées et réutilisées est difficile, avec le risque de voir se constituer des stocks (de combustible non retraité ou de plutonium séparé). Cet équilibre n'a d'ailleurs pas

encore été atteint sur le parc nucléaire français.

D'autre part, seul le mono-recyclage du combustible est techniquement maîtrisé aujourd'hui, alors qu'un multi-recyclage est nécessaire, c'est-à-dire que le combustible de deuxième génération (combustible MOX à l'uranium et au plutonium) n'est pas retraité.

Pour éliminer le plutonium dans les déchets (c'est-à-dire le recycler intégralement), la solution imaginée un temps par la France était l'introduction dans le parc de surgénérateurs, aujourd'hui abandonnés après l'arrêt définitif de Superphénix⁵.

Cette filière, combinée avec l'utilisation de MOX dans les réacteurs à eau sous pression, autorisait en théorie le multi-recyclage du plutonium, indispensable pour espérer éviter sa présence dans les déchets. L'introduction dans le parc de réacteurs autres que les réacteurs actuels sera de toutes façons nécessaire pour atteindre cet objectif.

De nouveaux concepts, tels que les réacteurs hybrides (couplés à un accélérateur) sont aujourd'hui étudiés en ce sens. Certains visent, outre le plutonium, à éliminer du bilan des déchets certains actinides mineurs ou produits de fission à vie longue.

Cette recherche entre dans une logique de retraitement poussé, où les différents éléments (plutonium, actinides mineurs, produits de fission) sont séparés et recyclés ou "brûlés" pour réduire toujours plus les quantités de déchets haute activité

à vie longue. Une telle stratégie, si elle est réalisable, n'est envisageable qu'à long terme.

Une comparaison des risques

Les stratégies de stockage direct et de retraitement-recyclage ne permettent pas d'atteindre les mêmes objectifs en termes de bilan global de matières présentes dans les déchets hautement radioactifs à vie longue. Dans un cycle idéal (où les flux de matières retraitées correspondent aux flux de matières recyclées), le retraitement-recyclage permet par rapport au stockage direct une diminution de la quantité totale des trois composants les plus importants de ces déchets, le plutonium, les actinides mineurs et les produits de fission. Toutefois, ce gain s'effectue au prix d'une diversification des déchets, dont certains sont plus difficiles à stocker (notamment à cause d'un dégagement thermique bien supérieur), donc d'une multiplication des problèmes de sûreté.

La valeur de ce gain est de plus extrêmement sensible à la qualité du cycle. Les opérations de retraitement et surtout de recyclage s'accompagnent de pertes liées aux procédés qui limitent leur résultat⁶. Surtout, l'avantage dans le bilan matières peut être annulé si le parc n'est pas à l'équilibre et que se constituent par exemple des stocks de plutonium non recyclé. Cet aspect est d'autant plus important que le passage d'une situation quelconque à une situa-

tion d'équilibre du retraitement-recyclage nécessite une longue période transitoire qui perturbe fortement le bilan et peut compromettre l'efficacité globale de la stratégie.

Outre leur résultat en termes de gestion des déchets hautement radioactifs à vie longue, les stratégies de stockage direct et de retraitement-recyclage se distinguent sur la prise en compte d'autres risques importants :

► La deuxième grande justification du retraitement, avec la gestion des déchets, est la meilleure utilisation des ressources énergétiques. Cet argument a d'ailleurs été historiquement décisif, en France, pour la mise en place de cette stratégie, au nom du principe d'indépendance énergétique, suite aux deux chocs pétroliers. Toutefois, la valorisation de l'uranium de retraitement et surtout du plutonium n'apparaît plus aujourd'hui comme un élément significatif sur le plan économique. Comptetenu du coût de fabrication supérieur du combustible MOX par rapport au combustible UOX classique, la valeur économique du plutonium séparé est aujourd'hui mise en doute⁷. Quant à l'uranium issu du retraitement, qui représente 99% environ des matières retraitées recyclables, il n'est actuellement utilisé que marginalement.

Les travaux du Club énergie, prospective et débats sur le risque d'épuisement des ressources fossiles tendent à montrer que, le rapport entre l'évolution prévisible des besoins

et des ressources étant favorable, la valeur économique accordée à la prise en compte de ce risque est aujourd'hui proche de zéro. Il semblerait, bien que cette question n'ait pas fait l'objet d'une étude à part entière, que le même schéma s'applique aux ressources fissiles⁸.

► Le stockage direct présente en revanche un avantage certain sur le retraitement-recyclage en termes de prolifération. C'est la principale raison pour laquelle les Américains ont refusé, à la fin des années 70, de s'engager dans la voie du retraitement. Le retraitement-recyclage, en transportant et en manipulant des matières nucléaires isolées, est un facteur de prolifération, en particulier du plutonium qui n'existe jamais, dans le cycle stockage direct, sous forme séparée.

► La complexité supérieure de la gestion des matières nucléaires dans la stratégie retraitement-recyclage génère également une exposition globalement supérieure des personnes et de l'environnement. Les expositions professionnelles, du fait notamment de la manipulation du plutonium, sont plus importantes : les expositions de la population et la contamination de l'environnement sont supérieures en cas d'accident; les rejets d'effluents radioactifs liquides et gazeux, y compris de radionucléides à très longue durée de vie, liés à l'usine de retraitement sont beaucoup plus importants; enfin la gestion des déchets est compliquée par

l'apparition d'une catégorie supplémentaire de déchets, les déchets de moyenne activité à vie longue (déchets vitrifiés enfermant les actinides mineurs et les produits de fission). Ces risques peuvent être réduits en améliorant la gestion du cycle; ils ne peuvent toutefois pas être ramenés au même niveau que pour le stockage direct.

On voit par là que le retraitement-recyclage conserve aujourd'hui un unique avantage réel non contesté : il permet une réduction jusqu'à 30 % (tableau 1) des quantités de matières hautement radioactives à vie longue dans les déchets par rapport à la stratégie de stockage direct. Cet aspect est fondamental par rapport à la prise en compte des risques de long terme liés à l'énergie. Il ne doit pas faire oublier pour autant les autres risques⁹.

Et d'abord, quel critère de limitation ?

Les stratégies possibles ne permettent pas, à des horizons raisonnables, d'éviter le problème central : rendre acceptable le stockage pour des périodes géologiques (plusieurs dizaines de milliers d'années) d'un stock continuellement croissant de déchets de très longue durée de vie et de forte radioactivité, en minimisant au mieux les risques pour les générations futures. Reste qu'aujourd'hui, il est loin d'être universellement admis par nos sociétés que notre génération ait le "droit" de laisser se constituer

de tels stocks de déchets rapidement croissants dans le sous-sol de notre planète.

La question se pose d'autant plus que ces stocks, encore peu encombrants aujourd'hui (quelques dizaines de milliers de tonnes de déchets haute activité à vie longue, renfermant quelques centaines de tonnes de plutonium, actinides mineurs et produits de fission) risquent d'être multipliés par 10 ou 20 dans les 50 années qui viennent avec les conséquences de multiplication et de dissémination ou de gonflement des sites de stockage que cela entraîne inéluctablement¹⁰.

On pourrait évidemment tenter une analyse "coûts-dommages" comme cela a été proposé pour le changement climatique, imaginer un "accident de stockage de référence", ses conséquences sur l'environnement local (eaux, sols, etc.), faire des hypothèses sur les populations concernées, les dommages qu'elles subiraient, les probabilités d'occurrence, etc. Mais tout cela fait on se heurtera au problème de prise en compte du temps. Doit-on donner la même valeur à un accident qui se produira du temps de nos enfants ou 10 000 ans plus tard ? La prise en compte d'un taux d'actualisation positif réduirait vite à néant la valeur des dommages, alors que l'aversion de notre société pour ce type de risque semble être justement liée à l'importance du temps sur lequel il existe. Quel que soit le résultat obtenu au bout d'un tel type de calcul, il paraît bien improbable que cette éva-

luation soit d'un grand secours dans l'état d'esprit actuel de l'opinion pour quelque décision d'investissement de précaution que ce soit.

Dans ces conditions (et au-delà de la question majeure d'un conditionnement et d'un stockage les plus sûrs possibles des déchets existants) ne serait-il pas raisonnable, comme on le fait pour les émissions de carbone, de tenter de limiter la croissance trop rapide de ces stocks de déchets, en attendant d'en savoir plus sur les risques de leur stockage et sur l'acceptabilité des solutions proposées ? Après tout, il existe aussi des solutions de stockage du CO₂ proposées par les chercheurs, dans le sous-sol profond ou dans les océans. Comme le retraitement et le stockage des déchets nucléaires, elles mettent en jeu des procédés qui consomment de l'énergie (provoquant de nouvelles émissions de carbone ou de nouveaux déchets nucléaires). Comme pour le retraitement et le stockage, la pérennité à long terme des solutions proposées reste hypothétique. Ce n'est pas pour autant qu'on renonce à une limitation du CO₂ sous le prétexte qu'on saura peut-être le stocker à plus ou moins long terme. Parmi les sous-produits de l'industrie nucléaire, le plutonium, les actinides mineurs et les produits de fission méritent une attention particulière parce qu'ils sont à la fois très radioactifs et de très longue durée de vie. Les deux derniers produits sont clairement des déchets dans leur intégralité. Le pluto-

nium peut, grâce au retraitement-recyclage, être partiellement réutilisé. Mais une part reste nécessairement, dans l'état actuel des techniques et de l'industrie, inutilisée et entre à ce titre dans le bilan des déchets. A ce titre, il est justifié de regrouper dans un même ensemble le plutonium (non réutilisé), les actinides mineurs et les produits de fission de durée de vie longue, qui présentent de nombreuses caractéristiques communes du point de vue des risques à long terme. C'est pourquoi, dans la suite, nous utiliserons la quantité totale de ces produits pour quantifier les évolutions des flux et des stocks de déchets hautement radioactifs à vie longue¹¹. Cette démarche avec ses approximations, est analogue à celle utilisée pour les gaz à effet de serre, où l'on a regroupé dans un même ensemble des gaz tels que le CO₂, le méthane ou les N₂O qui ont des caractéristiques temporelles d'absorption optique très différentes, en leur affectant des coefficients d'efficacité par rapport au CO₂. L'indicateur constitué des simples quantités de matières

radioactives mériterait, dans la même logique, d'être pondéré par des critères liés à leur nocivité et à son évolution dans le temps (radiotoxicité, dégagement thermique, etc.). En l'absence d'un consensus sur ces critères, l'évaluation des quantités mises en jeu permet malgré tout une première approche quantitative.

Comment procéder à cette limitation ?

On peut en effet calculer, sur la base de cycles de référence, les bilans de l'ensemble plutonium plus actinides mineurs plus produits de fission (Pu+AM+PF) dans les flux et les stocks de déchets.

La limite théorique de réduction de cette quantité Pu+AM+PF n'est pas la même dans les stratégies de stockage direct et de retraitement-recyclage. A production électrique constante, cette quantité peut diminuer :

- soit en augmentant les rendements (on diminue les quantités de matière nécessaire donc les volumes de déchets) par augmentation des taux de combustion dans les réacteurs

actuels ou par introduction de réacteurs à meilleur rendement thermique (par exemple les réacteurs HTR);

- soit en optimisant l'utilisation des matières via le retraitement-recyclage (tout en améliorant dans cette stratégie les rendements).

L'évaluation des flux de déchets sur différents cycles réalisables dans les conditions technologiques actuelles (réacteurs à eau pressurisée et utilisation d'oxyde d'uranium avec ou sans monorecyclage du combustible utilisé sous forme de MOX) montre que le gain sur les quantités P+AM+PF dans les déchets ne peut dépasser une limite de 20 % environ dans la stratégie stockage direct. Cette limite atteint en revanche 30 ou 40 % dans la stratégie retraitement-recyclage.

Ainsi, les quantités totales de ces trois types de déchets oscillent entre 3,3 tonnes (pour un parc équilibré et utilisant au mieux le monorecyclage du combustible sous forme de MOX) et 4,6 tonnes dans le plus mauvais des cas, pour 100 TWh d'électricité, comme le montre le tableau 1.

Tableau 1 :
Quantité de déchets nucléaires produits pour différents cycles du combustibles
(pour 100 TWh d'électricité produite)

| Cycle | Cycle ouvert | | Monorecyclage | |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|--|
| | Référence | Poussé | Référence | Poussé |
| Parc de réacteurs REP | 100 % UO ₂ | 100 % UO ₂ | 52 % UO ₂ 48 % MOX 30 % | 59 % UO ₂ 41 % MOX 30 % |
| Taux de combustion (GWjour/tonne) | 33 | 60 | 33 | UO ₂ 47,5 UO ₂ + MOX 43,5 |
| Déchets (tonnes) | | | | |
| Plutonium | 3,4 | 2,5 | 1,9 | 1,87 |
| Actinides | 0,3 | 0,42 | 0,45 | 0,52 |
| Produits de fission à vie longue | 0,95 | 0,82 | 0,95 | 0,87 |
| Total | 4,65 | 3,74 | 3,3 | 3,26 |

Ceci est une réédition électronique réalisée en 2010 à partir d'exemplaires originaux et en reproduisant le plus fidèlement possible la maquette initiale

Comment évolueraient les quantités de ces matières dans les stocks de déchets nucléaires dans l'hypothèse d'une reprise du nucléaire ? Pour fixer les idées on peut prendre pour scénario de référence l'évolution de la production d'électricité nucléaire mondiale de 1990 à 2050 prévue récemment par l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE et évaluer la quantité de déchets (actinides et produits de fission à longue durée de vie) qu'il sera nécessaire d'avoir stocké en fin de période ¹².

L'AEN a établi trois scénarios résumés dans le tableau ciaprès (Tableau 2) :

- Scénario 1 "Abandon" : l'énergie nucléaire serait progressivement abandonnée d'ici 2045,
- Scénario 2 "Poursuite du développement de l'énergie

nucléaire" : la puissance installée est supposée augmenter linéairement jusqu'à 1120 GW en 2050,

- Scénario 3 "Déclin suivi d'une reprise" : ce scénario prévoit une fermeture précoce des centrales nucléaires à court terme (jusqu'en 2015) suivie d'une reprise vers 2020 avec une capacité analogue en 2050 à celle installée dans le scénario 2.

Les flux et les stocks de déchets, pour une hypothèse médiane de 3,9 tonnes pour 100 TWh produits, s'établissent comme indiqué sur le tableau 3.

Dans le scénario "poursuite du développement" le stock de déchets a l'allure d'une parabole (fig. 1) : il est multiplié par un facteur 6,5 entre 2000 et 2050 (11 entre 1990 et 2050) et continue à croître après 2050, même si aucune nouvelle centrale n'est construite, au rythme

de 300 tonnes par an pendant les trente ans qui suivent. En flux, dans ce scénario, les déchets augmentent de 56 % entre 2000 et 2020, de 100 % en 2030 et de 200 % environ en 2050.

Imaginons que la communauté internationale parvienne à s'engager par exemple sur une limitation à plus 20 % des flux totaux de déchets nucléaires en 2020 par rapport à 2000 au lieu des 50 % d'augmentation à laquelle on peut s'attendre dans le scénario "poursuite", et 50 % en 2050 au lieu du facteur 3 prévu. Ce ne sont pas des objectifs très ambitieux. Réduire en effet le flux total de déchets de 166 tonnes à 127 tonnes en 2020 suppose de parvenir à réduire à 3,1 tonnes les déchets produits par 100 TWh d'électricité nucléaire à cet horizon. Le tableau 1

Tableau 2 : Scénarios de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN)

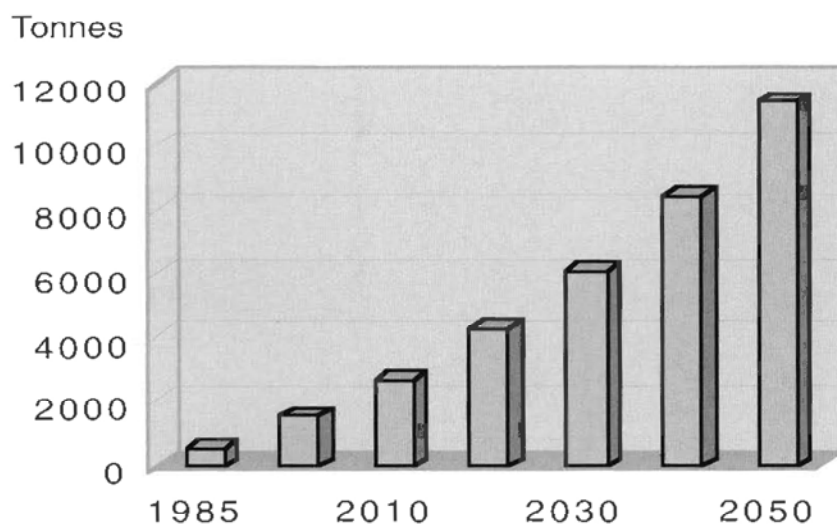
| Scénario | 1985 | 2000 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| Abandon | | | | | | | |
| Puissance installée (GW) | 210 | 360 | 354 | 257 | 54 | 2 | 0 |
| Electricité produite ¹ (TWh/an) | 1480 | 2628 | 2584 | 1876 | 394 | 15 | 0 |
| Poursuite du développement | | | | | | | |
| Puissance installée (GW) | 210 | 367 | 453 | 569 | 720 | 905 | 1120 |
| Electricité produite ¹ (TWh/an) | 1480 | 2679 | 3307 | 4154 | 5256 | 6607 | 8176 |
| Déclin suivi d'une reprise | | | | | | | |
| Puissance installée (GW) | 210 | 355 | 259 | 54 | 163 | 466 | 1120 |
| Electricité produite ¹ (TWh/an) | 1480 | 2592 | 1891 | 394 | 1190 | 3402 | 8176 |

(1) Taux de disponibilité de 83 % soit 7300 heures par an

Tableau 3 : Flux et stocks de déchets associés aux scénarios de l'AEN

| Scénario | 1985 | 2000 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Abandon | | | | | | | |
| Flux annuel de déchets (tonnes) | 59 | 106 | 102 | 98 | 21 | 1 | 0 |
| Stocks cumulés (tonnes) | 585 | 1600 | 2640 | 3525 | 3976 | 4029 | 4029 |
| Poursuite du développement | | | | | | | |
| Flux annuel de déchets (tonnes) | 59 | 106 | 132 | 166 | 210 | 263 | 326 |
| Stocks cumulés (tonnes) | 585 | 1600 | 2786 | 4276 | 6157 | 8525 | 11470 |
| Déclin suivi d'une reprise | | | | | | | |
| Flux annuel de déchets (tonnes) | 59 | 103 | 76 | 16 | 48 | 135 | 326 |
| Stocks cumulés (tonnes) | 585 | 1600 | 2493 | 2952 | 3272 | 4190 | 6497 |

Figure 1 : Stocks de déchets nucléaires (actinides + produits de fission) dans le scénario poursuite du développement



montre que des solutions sans rupture technologique sont à portée de la main pour y parvenir, par une meilleure utilisation du combustible dans un cycle ouvert ou éventuellement un recyclage du combustible et au besoin une amélioration encore modeste du rendement thermodynamique des centrales électriques (actuellement limité autour de 30 %).

L'objectif 2050 est évidemment beaucoup plus ambitieux puisqu'il suppose, pour ne pas entraver le développement de la production d'électricité nucléaire, de parvenir à des flux de déchets de l'ordre de 1 tonne pour 100 TWh. Il serait nécessaire pour obtenir ce résultat :

- d'une part, d'engranger l'ensemble des progrès techniques à portée de la main à la fois sur l'utilisation du com-

bustible et sur l'augmentation du rendement thermodynamique : les effets cumulés de ces progrès pourraient permettre d'atteindre des flux légèrement inférieurs à 2 tonnes pour 100 TWh, une réduction de moitié par rapport à aujourd'hui,

- d'autre part, d'avoir mis au point industriellement à cette date des méthodes de retraitement et d'incinération qui aboutissent à une élimination de 50 % des déchets restants¹³. On pense à des technologies d'incinération susceptibles de gains beaucoup plus importants (division par 10 des masses de déchets) mais encore appliquées partiellement à cette époque.

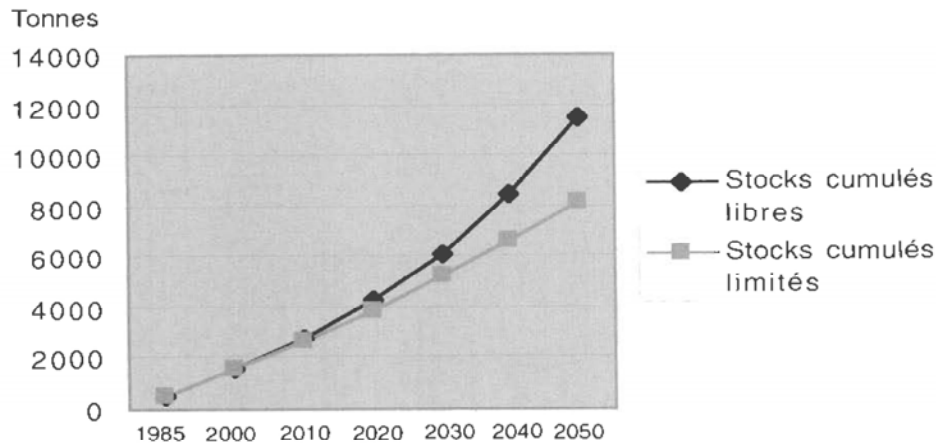
La traduction en terme de stocks de déchets d'une telle limitation est indiquée sur la figure 2.

En 2050 la quantité de déchets stockés ne serait que les 2/3 de ce qu'elle aurait été sans effort de limitation des flux unitaires de déchets. Bien entendu, à plus long terme la divergence entre les deux scénarios deviendrait beaucoup plus significative.

La contrainte appliquée sur les flux de déchets peut faire l'objet d'une répartition de quotas entre les pays producteurs d'énergie nucléaire sur des principes analogues à ceux développés pour le carbone. Les gouvernements et les entreprises pourraient développer des stratégies diverses pour respecter leurs engagements, par exemple :

- développer des filières nucléaires à meilleur rendement dans lesquelles le combustible nucléaire est mieux valorisé (de 30 à

Figure 2 :
Evolution des stocks de déchets à vie longue avec et sans limitation



60 GWjour/tonne par exemple) et la densité de déchets au kWh diminuée (en passant par exemple de valeurs de l'ordre de 4,6 tonnes pour 100 TWh à 3,6 tonnes pour 100 TWh, voire mieux, comme le montre le tableau 1),

- développer des filières thermodynamiques plus performantes de conversion de la chaleur nucléaire disponible, permettant de mieux rentabiliser la fission, par exemple en utilisant des réacteurs haute température dont les rendements thermodynamiques pourraient atteindre 50 % au lieu des 32 ou 33 % actuels des REP (un gain de 50 %),
- développer des stratégies d'élimination partielle des déchets (incinération, transmutation...),
- développer des filières capables de consommer la plupart de leurs déchets
- développer des filières utili-

sant des combustibles moins émetteurs de déchets à vie longue, etc. (voir les Cahiers de Global Chance N° 11, avril 1999).

Leur resterait sinon le choix de ralentir leur production nucléaire, voire même d'acheter sur le marché international des permis d'émission de déchets à des pays qui en disposent. Une telle stratégie de limitation des déchets conduirait en fait à accorder une valeur à l'évitement d'une unité supplémentaire de déchets, un coût à la tonne de déchets nucléaires produite, comme on le voit aujourd'hui pour le carbone.

Mais à quel prix ?

Pour développer une telle stratégie de limitation il est évidemment important, comme dans le cas des économies de carbone, d'avoir une première

évaluation du coût à la tonne produite et de son évolution au fur et à mesure que la contrainte se resserre.

Nous avons choisi d'en donner un premier ordre de grandeur en analysant la stratégie actuellement déployée par la France dans le domaine des déchets. En effet, la France, au contraire d'autres pays de l'OCDE, a décidé très tôt de retraiter le combustible UO₂ irradié pour en séparer le plutonium.

Cette stratégie était à l'origine essentiellement motivée par les économies de ressources primaires, donc les avantages en termes d'indépendance énergétique qu'elle apportait, en accompagnant ce programme d'un équipement du parc en réacteurs à neutrons rapides. Cette filière est aujourd'hui abandonnée, les craintes sur le coût de l'uranium et sur le risque d'épuisement de cette ressource au niveau mondial

se sont estompées. Le recyclage du plutonium sous forme de combustible MOX n'apparaît plus aujourd'hui comme un gain mais comme un surcoût – EDF n'accorde d'ailleurs plus grande valeur économique au plutonium séparé, et ne semble plus souhaiter un développement de l'utilisation de MOX dans son parc de réacteurs.

On voit bien que dans ces conditions, la justification essentielle du retraitement est bien devenue de fait de diminuer la quantité de déchets à vie longue et à radioactivité élevée associée à la production d'électricité nucléaire.

L'estimation du surcoût de ce traitement par rapport à un scénario sans retraitement et stockage direct des déchets et la mesure des économies de déchets ainsi obtenues donne donc un ordre de grandeur du coût que la France consent pour réduire sa production de déchets à vie longue d'une tonne.

Le coût estimé de l'évitement de déchets réalisé à travers le retraitement-recyclage doit prendre en compte le coût de cette industrie (c'est-à-dire les industries du retraitement et de fabrication de MOX), incluant les coûts passés de recherche-développement, les investissements et les coûts d'exploitation, en soustrayant le bénéfice retiré du recyclage, c'est-à-dire l'avantage économique lié à l'utilisation de matières énergétiques recyclées par rapport à des matières nouvellement extraites. Cette évaluation économique à partir des calculs effectués par les méthodes clas-

siques par le ministère de l'industrie (DIGEC) ou l'AEN (Agence pour l'énergie nucléaire) s'avère difficile pour plusieurs raisons :

► Le fait que ces évaluations ne ventilent pas les frais de R&D sur les différents postes liés à la production nucléaire (exploitation, cycle du combustible, démantèlement, etc.) sauf pour l'enfouissement des déchets en calculant à part le coût des laboratoires souterrains. Or, le poste "recherche et développement", calculé à part, est augmenté par la mise au point d'une stratégie retraitement-recyclage.

► Le caractère incomplet des évaluations des frais associés à la gestion des déchets dans le cas du retraitement-recyclage. En effet, si le calcul se fait, pour le cycle ouvert, sur le stockage (avec comme hypothèse l'enfouissement dans les évaluations classiques) de l'ensemble des combustibles irradiés, il ne prend en compte, pour le cycle dit "fermé", que les déchets haute activité issus du retraitement; pour les combustibles MOX irradiés, pourtant non retraités, seul un entreposage (qui couvre quelques dizaines d'années) est éventuellement pris en compte (mais ce n'est même pas le cas dans l'étude de l'AEN-OCDE), et pas leur stockage définitif.

► Les évaluations classiques accordent, au titre de leur potentiel énergétique, un crédit à l'uranium et au plutonium séparés par le retraitement. Toutefois, leur crédit ne doit être inclus au calcul que si ces

matières sont effectivement recyclées, ce qui n'est pas le cas actuellement de l'uranium. Surtout, bien que le plutonium de première génération soit intégralement recyclé dans les cycles de monorecyclage équilibré, ce n'est pas le cas du plutonium de deuxième génération, qui est au contraire intégralement stocké.

► Enfin, une évaluation complète devrait prendre en compte la différence de coût de fabrication qui peut exister entre le combustible UO₂ et le combustible MOX que l'on introduit dans la stratégie de retraitement-recyclage. Cette comparaison des coûts des combustibles est difficile et controversée, et nous retiendrons pour cette étude l'hypothèse, très probablement favorable au retraitement-recyclage, selon laquelle les coûts de l'UO₂ et du MOX sont équivalents.

La comparaison entre le retraitement-recyclage et le stockage direct a en particulier été présentée par l'OCDE dans une étude de 1994 qui fait encore référence. Les résultats des coûts de référence calculés par la DIGEC, avec des hypothèses comparables, sont tout à fait compatibles avec les conclusions de l'étude OCDE.

Le tableau 4 ci-après donne le récapitulatif de l'évaluation menée par l'AEN (les deux premières colonnes). On a complété, dans une troisième colonne, cette évaluation en y intégrant les remarques ci-dessus. En particulier, pour compléter cette évaluation du retraitement-recyclage, on a ajouté un coût pour l'entreposage du

combustible utilisé avant stockage définitif (en se basant sur une équivalence entre le coût de l'entreposage du combustible UO₂ - cycle ouvert - ou du MOX - monorecyclage à l'équilibre); et on a affecté au stockage des déchets un coût égal au stockage des déchets haute activité plus le stockage des combustibles MOX irradiés (en se basant sur une équivalence entre le coût du stockage du combustible UO₂ et du combustible MOX). De plus, on a considéré que le coût de stockage des déchets de haute activité, compte tenu de leur dégagement thermique n'est pas sensiblement plus faible (comme le laisse entendre le calcul AEN-OCDE) mais à peu près équivalent au coût de stockage des combustibles usés (à tonnage de départ de combustible égal).

Enfin on n'a affecté aucun crédit à l'uranium ni au plutonium. L'uranium n'est en effet pas recyclé aujourd'hui, ou très

peu, pour des raisons économiques qui tiennent au coût faible de l'uranium naturel. Quant au plutonium, il s'agit ici du plutonium de deuxième génération, piégé dans le combustible MOX non retraité, qu'il n'est donc pas possible de retraiter et de recycler dans les conditions d'un monorecyclage à l'équilibre.

Reste à prendre en compte un surcoût de R&D lié au développement de la filière retraitement-recyclage. Celui-ci n'est pas facile à évaluer car les détails du financement et de la ventilation de la R&D ne sont pas bien connus. L'ensemble des frais de R&D s'élève pour la DIGEC à 0,36 c/kWh, sans compter la R&D financée par l'Etat. D'autre part, les bilans de R&D fournis par le CEA montrent que les efforts spécifiques au développement du retraitement-recyclage représentent au moins un quart du total de la R&D. Il paraît donc raisonnable d'affecter de

l'ordre de 0,1 c/kWh à la R&D sur ce poste.

Avec la prise en compte de ces éléments complémentaires, la stratégie retraitement-recyclage fait apparaître un surcoût au kWh de 1,1 centimes. La stratégie retraitement-recyclage décrite permet donc des économies de déchets à haute activité et à vie longue pour un coût de l'ordre de 1 milliard de francs par tonne.

Cette évaluation ne constitue bien évidemment qu'un ordre de grandeur du coût à la tonne de déchets évités par la stratégie de recyclage actuelle. Des enquêtes plus approfondies sur les postes de surcoûts et la justification de leurs affectations sont encore nécessaires. Il serait intéressant d'autre part de poursuivre l'analyse en comparant ce coût avec celui d'autres stratégies comme les cycles ouverts pousser sans recyclage.

Tableau 4. Détail du coût de la fin de cycle du combustible (en centimes par kWh)

| | Stockage direct (AEN) | Retraitement-recyclage (AEN) | Retraitement-recyclage (AEN complété) |
|--|-------------------------------|---------------------------------|--|
| Transport du combustible utilisé | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| Entreposage du combustible utilisé | 0,31 | - | 0,05 |
| Retraitement et vitrification déchets haute activité (HA) | - | 1,20 | 1,20 |
| Stockage des déchets | 0,69 (combustible utilisé) | 0,11 (déchets HA) | 0,69 (déchets HA + comb MOX utilisé) |
| Sous-total fin de cycle | 1,10 | 1,41 | 2,04 |
| Crédit uranium | - | -0,18 | 0 |
| Crédit plutonium | - | -0,07 | 0 |
| Sous-total crédit | - | -0,25 | 0 |
| Surcoût de R&D | | | 0,1 |
| COÛT TOTAL | 1,10 | 1,16 | 2,14 |

Source : Rapport au Commissariat Général du Plan

En guise de conclusion provisoire et de guide pour une négociation internationale

Nous avons tenté de montrer dans cet article qu'une solution de contrôle des flux de déchets nucléaires à haute activité et vie longue pouvait constituer une réponse éthiquement valable, aux préoccupations de nos sociétés vis-à-vis des incertitudes scientifiques et de l'acceptabilité sociale du stockage à très long terme de ces déchets.

Nous fondant sur une analogie avec l'application du principe de précaution vis-à-vis des émissions de carbone responsables du renforcement de l'effet de serre (qui a conduit la communauté internationale à proposer une limitation de la croissance des émissions de carbone), nous proposons d'engager une discussion internationale :

- sur la pertinence d'un concept de contrôle à terme des flux (voire des stocks) de déchets nucléaires à haute activité et vie longue (actinides majeurs et mineurs, produits de fission à vie longue),
- sur les objectifs quantitatifs et la nature des règles de répartition de l'effort de réduction à mettre en place que pourrait se fixer la communauté internationale,
- sur les stratégies techniques à développer pour y parvenir aux moindres coûts.

L'analyse à laquelle nous nous sommes livrés montre que certaines des stratégies d'aval du cycle nucléaire mises en place

par les pays producteurs prennent déjà en compte explicitement ou implicitement cette préoccupation. Ces filières n'ont cependant pas été développées à l'origine pour satisfaire à ce critère de minimisation des déchets. C'est en particulier le cas du retraitement recyclage pratiqué à l'heure actuelle en France qui, indépendamment des risques nouveaux qu'il engendre à court terme (création de nouveaux déchets et sûreté des installations), apparaît comme une stratégie au potentiel rapidement limité et très coûteuse. Il est donc très probable qu'elles ne constituent pas la seule et la meilleure manière de répondre à cet objectif.

De ce point de vue, il paraît intéressant :

- de progresser dans la construction d'indicateurs pertinents pour l'évaluation du risque associé aux déchets hautement radioactifs à vie longue,
- de relier ces indicateurs à l'évaluation plus générale de l'ensemble des risques associés à l'énergie nucléaire afin de pouvoir comparer les stratégies possibles dans une approche globale des risques,
- d'explorer les avantages et les inconvénients des différentes technologies proposées pour le proche avenir et le futur plus lointain en évaluant le potentiel et les limites physiques de chacune des filières du point de vue d'une minimisation des stocks de déchets à vie longue et haute activité,
- d'évaluer les coûts d'évitement associés à chacune des solutions.

L'intérêt d'une telle démarche nous semble résider dans le fait qu'elle évite de se cantonner dans le débat actuellement sans issue entre les tenants inconditionnels d'un stockage à long terme des déchets nucléaires considéré comme totalement sûr pour plusieurs centaines de milliers d'années et ceux qui refusent pour des raisons de nature éthique de faire prendre un risque, fût-il mineur, aux générations futures.

A ce titre elle apparaît comme une contribution, certes non suffisante mais néanmoins non négligeable à la réconciliation potentielle du nucléaire et du développement durable et permet de redonner un équilibre à l'application du principe de précaution à deux risques majeurs à long terme liés aux systèmes énergétiques, l'effet de serre et le stockage des déchets à haute activité et vie longue.

Elle n'empêche évidemment pas, bien au contraire, de continuer à consacrer tous ses efforts à la recherche des solutions les plus sûres possibles au conditionnement, à l'entreposage temporaire et au stockage définitif des déchets déjà existants ou inéluctables à court terme.

Si la question de l'aval du cycle du combustible et de la gestion des déchets demeure pour nos sociétés le point de blocage principal au développement de l'énergie nucléaire, la prise en compte du principe de précaution sous la forme d'un contrôle des flux de déchets

associés est de nature à faire évoluer sensiblement l'acceptabilité de cette filière et à relancer un effort scientifique et technologique précisément centré sur la solution à cette préoccupation. Les marges de manœuvre techniques sont encore considérables. La mise en œuvre de stratégies adaptées pourrait permettre un développement plus harmonieux du nucléaire sans courir le risque actuellement considéré comme inacceptable de laisser se constituer des stocks de déchets dont la croissance serait parabolique au siècle prochain.

notion de globalité (c'est le cas des émissions de gaz à effet de serre et du changement climatique), mais leur cumul n'est pas indispensable pour justifier le caractère global du problème : c'est ainsi que la protection de la biodiversité renvoie le plus souvent à des problèmes très locaux (préservation de milieux et d'espèces) mais trouve aujourd'hui sa place sur l'agenda des risques "globaux" et constitue à ce titre un volet important de l'intervention du FEM (Fonds de l'Environnement Mondial) et de son équivalent français (le FFEM). Nous avons ainsi fait le choix de retenir, dans notre travail, une acception du concept de "risque global" qui dépasse la vision strictement spatiale (au sens du changement climatique planétaire) et renvoie à l'existence d'une "préoccupation pouvant concerner l'ensemble de l'humanité".

2 Les émissions de gaz à effet de serre liées à l'industrie nucléaire sont, comparativement aux énergies fossiles, très faibles. Cet argument fournit aujourd'hui, au niveau mondial, le meilleur espoir de reprise pour l'énergie nucléaire. La relation directe entre nucléaire et diminution des émissions de gaz à effet de serre mériterait toutefois d'être examinée par les experts sous l'angle macro-économique et systémique : en effet, le nucléaire suppose aujourd'hui une production très centralisée et peu flexible, qui nécessite par exemple (sous peine de pertes en réseau de l'énergie électrique) une concentration de la consommation (donc des problèmes d'urbanisme, de transport, etc.). Le recours important au nucléaire pourrait, en d'autres termes, constituer un frein à l'efficacité énergétique, pourtant indispensable pour réduire la consommation d'énergie.

3 Créé à l'issue des travaux de la Commission Energie 2010-2020,

ce Club regroupe des personnalités de différentes origines (entreprises, ONG, administrations, universités, etc.) intéressées par les problèmes du long terme posés par l'énergie et l'environnement

4 Les principales catégories de déchets radioactifs produits par l'industrie nucléaire sont, selon la classification adoptée en France :

- les résidus miniers issus de l'extraction du minerai d'uranium,
- les déchets TFA (très faible activité) qui proviennent essentiellement des matériaux de construction des installations (lorsque celles-ci sont démantelées),
- les déchets A, de faible et moyenne activité à vie courte (matériels divers liés à l'exploitation des installations),
- les déchets B, de moyenne activité à vie longue, essentiellement issus de l'entretien des installations de retraitement du combustible,
- enfin les déchets C, de haute activité à vie courte ou longue, qui contiennent, sous diverses formes selon qu'il est retraité ou non, les matières qui composent le combustible usé. Officiellement, cette catégorie ne recouvre que les déchets vitrifiés issus du retraitement, qui contiennent exclusivement les actinides mineurs et les produits de fission extraits des combustibles irradiés. La réalité est différente : d'abord, le retraitement procède à la séparation des matières jugées valorisables (l'uranium et surtout le plutonium) qui doivent, si elles ne sont pas réutilisées être considérées comme des déchets. En particulier, le plutonium séparé non recyclé, qui perd sa qualité énergétique en quelques années, doit un jour être considéré comme un déchet à haute activité et vie longue, et des plus dangereux. A l'inverse, le combustible non retraité ne reste pas indéfiniment réutilisable (sa qualité se dégrade) et devient également un déchet. Ainsi, une partie du combustible

Notes

1 Cette notion de globalité recouvre en effet à la fois une dimension de nature spatiale (le problème est global s'il touche directement l'ensemble des sociétés humaines actuelles, c'est-à-dire la planète) mais aussi temporelle puisqu'elle recouvre les préoccupations de l'humanité à l'égard des générations futures. En fait, à travers cette préoccupation des droits et des ressources à protéger pour les générations futures, la notion de globalité quitte le terrain purement spatial et s'apparente à celle de "patrimoine de l'humanité". L'humanité se considère alors comme ayant une responsabilité globale envers les générations futures, même si les conséquences de son action ne concernent qu'une partie de ces générations (par exemple dans une région déterminée). Les deux notions de temps et d'espace peuvent se cumuler dans la

de première génération (combustible UOX, à l'uranium) n'est pas retraitée actuellement. Surtout, le retraitement ne s'applique qu'au combustible de première génération et pas au combustible de deuxième génération fabriqué à partir d'uranium (généralement neuf) et de plutonium issu du retraitement (combustible MOX). Aussi, le combustible MOX usé, même s'il est entreposé pour permettre son refroidissement, devra un jour être pris en compte comme déchet hautement radio-actif à vie longue.

- 5 Et ce même si Phénix doit encore être utilisé pour des expériences liées aux recherches sur la gestion des déchets.
- 6 La plus importante de ces pertes se situe actuellement au niveau de la fabrication du combustible MOX, où le taux de rebut – donc la quantité de plutonium recyclé dans du MOX qui devient en réalité un déchet – atteint de 10 à 20 %.
- 7 Cette réalité économique se traduit d'ailleurs depuis quelques années dans la comptabilité d'EDF par un crédit nul pour le plutonium séparé en stock.
- 8 L'argument souvent développé d'une valeur de "réserve énergétique" à accorder au plutonium ainsi séparé et stocké pour l'avenir, au sens des sources d'énergie fossile est donc aujourd'hui contesté. Dans le contexte actuel d'un développement très modéré de l'énergie nucléaire, cette valeur se révèle en fait très faible, dans la mesure où les ressources d'uranium à bon marché apparaissent comme très largement suffisantes pour alimenter la filière dans les 40 ou 50 ans qui viennent. On sait d'autre part que ces réserves seraient multipliées par un facteur important si on accepte un prix de combustible plus élevé.
- 9 A bien des égards, le retraitement apparaît en effet comme une prime donnée au long terme aux dépens du court terme, ou comme un facteur de dispersion du risque. Au-delà de l'exercice qui consiste à quantifier économiquement les gains permis par le retraitement sur le bilan matière des déchets hautement radioactifs à vie longue, une discussion globale sur les avantages et inconvénients de cette stratégie dans une approche globale des risques est nécessaire.
- 10 On considère en général que la responsabilité de la gestion de ses déchets nucléaires revient à chaque pays qui en produit. Dans cette optique, chaque pays producteur devra créer son, voire ses sites de stockage de déchets à vie longue. Toutefois, concernant des sites aménagés pour des dizaines ou centaines de milliers d'années, la notion de frontière est discutable. De plus, certains petits pays (Belgique, Pays-Bas) n'ont pas les mêmes disponibilités de sites géologiques adéquats que les pays très étendus. C'est pourquoi des voix s'élèvent pour demander une gestion internationale du problème, avec la création d'un puits de plusieurs sites internationaux.
- 11 Ce tonnage est très inférieur au tonnage total des déchets hautement radioactifs à vie longue : ainsi, ces déchets représentent, en métal lourd, quelques centaines de tonnes pour 100 TWh produits.
- 12 Ces scénarios nucléaires s'insèrent dans la logique des scénarios de l'IIASA construits à la demande du Conseil Mondial de l'Energie en 1995. Ils sont compatibles avec les scénarios C de cet organisme, dont la demande d'énergie totale en 2050 pour le monde n'atteint que 15 Gtep. D'autres scénarios de l'IIASA projettent des consommations beaucoup plus élevées d'énergie (25 Gtep en 2050) et proportionnellement une production nucléaire beaucoup plus élevée. De tels scénarios reposent sur une hypothèse de croissance du nombre d'installations bien supérieure à celle des périodes passées. Ils semblent, au vu de la stagnation du nucléaire au plan mondial observée ces dernières années, assez improbables. Toutefois, ils illustrent à l'extrême l'hypothèse théorique d'une reprise forte du nucléaire motivée par la précaution vis-à-vis du réchauffement climatique.
- 13 Une autre stratégie reposant sur l'emploi de nouveaux combustibles, le thorium par exemple, pourrait constituer une alternative ou un complément aux deux premières.
- 14 Yves Maignac (GHDSO), Le problème des déchets nucléaires à vie longue : éléments de réflexion sur le calcul d'une valeur d'évitement. Rapport présenté au Commissariat Général du Plan, Club "Energie, prospective et débats", Groupe 3, Septembre 1999.