

Le cycle du combustible et le problème des déchets radioactifs

Claude FREJACQUES

Lorsque Monsieur le Professeur DAUSSET m'a demandé de faire cet exposé, j'ai hésité car j'ai quitté ce domaine depuis 7 ans. Mais il n'est peut-être pas mauvais que quelqu'un qui a travaillé pendant 25 ans dans le nucléaire et par conséquent l'a vécu et maintenant s'en est éloigné et a donc un certain recul, qui est confronté par son rôle actuel aux autres problèmes de l'environnement, vous expose les grandes lignes de ces questions telles qu'il les ressent. Je tâcherai de vous exposer l'ensemble du problème des effluents et des déchets liés au cycle du combustible nucléaire tel qu'on peut l'appréhender avec une approche rationnelle. Je n'ai pas besoin de vous dire que c'est le scientifique qui parlera et non le conseiller du Ministre.

Ce soir, après vous avoir rappelé les grandes lignes du programme électronucléaire français, je vous donnerai une description simplifiée du cycle du combustible, puis nous passerons en revue les nuisances radioactives en rappelant les conclusions de la conférence

du Professeur Tubiana dans ce cycle - que certains d'entre vous n'ont peut-être pas suivie - nous passerons ensuite aux démarches de la protection, c'est-à-dire dans le domaine des effluents, la dilution et le rejet dans l'environnement à un niveau suffisamment bas pour être sans effet sur la santé publique et, dans le domaine des déchets actifs, la concentration des produits et la réalisation des barrières les plus résistantes possibles pour attendre leur décroissance.

Rappel sur le programme électronucléaire français

La consommation d'énergie primaire en France depuis 1973, par conséquent depuis la guerre du Kippour et la crise du pétrole, jusqu'en 1986 a connu une grande variation dans ses sources. Le pétrole, qui constituait les 2/3 de notre approvisionnement, n'en représente plus que 43 % avec des avantages évidents sur le plan économique et sur le plan des devises; le charbon a diminué, passant de 15 à 10 %; par contre, la différence est due essentiellement au nucléaire qui représente à l'heure actuelle un peu plus du quart des fournitures d'énergie primaire en France.

Les sources de production d'électricité ont subi une évolution encore plus marquée : la production hydraulique a légèrement baissé en proportion mais pas en absolu; la production thermique à partir du fuel a diminué très sensiblement; le nucléaire est monté en puissance d'une manière très forte puisque maintenant les 2/3 de l'électricité produite en France sont fournis par des réacteurs nucléaires. J'aurais tendance à dire qu'une gestion en bon père de famille amènerait à ne pas aller au-delà, par souci de sécurité et d'équilibre entre les différents types d'énergie.

Le cycle du combustible

Le cycle du combustible commence à l'extraction de l'uranium dans les mines, se poursuit par sa concentration et sa transformation

en hexafluorure d'uranium, son enrichissement dans une usine de diffusion gazeuse, sa retransformation en oxyde et la fabrication des éléments combustibles proprement dits. Le passage de ceux-ci dans les réacteurs nucléaires, leur stockage sous forme d'éléments combustibles irradiés, leur passage dans une usine de retraitement qui va séparer l'uranium restant qui sera recyclé, le plutonium, et les produits de fission et les transuraniens résiduels qui sont les déchets les plus radioactifs de tout le cycle.

En ce qui concerne le problème des effluents et des déchets radioactifs, la question probablement la plus vraie qui se pose à l'heure actuelle en dehors des produits de fission et des transuraniens déjà signalés, est due aux stériles de mines : quand vous extrayez l'uranium des mines, vous avez en moyenne des concentrations d'uranium dans les minerais qui sont de l'ordre de quelques pour mille, c'est-à-dire que toutes les fois que vous extrayez une tonne d'uranium, vous avez 300 ou 400 tonnes de stériles; or ces stériles contiennent des produits de décroissance radioactifs de la filière de l'uranium. Ceux-ci préexistaient dans le sol, mais ils sont mobilisés par les traitements tant mécaniques que chimiques qui ont lieu pour extraire l'uranium du minerai et les précautions nécessaires n'ont pas toujours été prises au début du nucléaire et ont été une source de dispersion de la radioactivité dans l'environnement non négligeable.

Ensuite, ces minerais vont être concentrés, puis extraits par un procédé chimique pour donner ce qu'on appelle le "yellow cake" qui est de l'oxyde d'uranium. Cet oxyde va être ensuite transformé en UF₆, et ces transformations ne posent pas de gros problèmes au point de vue de l'environnement, les nuisances chimiques étant du même ordre de grandeur que les nuisances radiologiques. Le fluor contenu dans l'UF₆ est, comme vous le savez, un élément chimique extrêmement actif, qui, en présence d'eau, va donner de l'acide fluorhydrique qui est lui-même un composé très agressif. On transforme donc cet UO₂ en UF₆ et on va ensuite faire passer cet UF₆ dans des usines d'enrichissement. Ces usines transformeront l'uranium naturel, qui est un uranium contenant 0,72 % d'uranium 235 qui en est la partie noble sensible à la fission par les neutrons lents en un uranium con-

tenant environ 3 % d'uranium 235. Cette concentration isotopique est la plus favorable pour faire de l'électricité dans les réacteurs à eau sous pression qu'utilise EDF.

Cet uranium enrichi va être ensuite retransformé en UO₂ puis servira à fabriquer des éléments combustibles. Ce seront de petites pastilles d'oxyde qui vont être mises dans des tubes métalliques. Ces tubes, groupés entre eux, vont constituer le coeur du réacteur nucléaire. La réaction de fission qui va se propager dans les atomes d'uranium du coeur va dégager de la chaleur qui va être transmise à l'eau sous pression qui entoure les tubes des éléments combustibles. Par l'intermédiaire d'un échangeur cette eau créera de la vapeur qui va faire marcher les alternateurs de la centrale. Cet UO₂ va donc être transformé en élément combustible, passer dans les réacteurs à eau pressurisée et y rester pendant deux ou trois ans. Ces éléments combustibles vont ressortir très irradiés. Les éléments combustibles irradiés vont être stockés en piscine puis envoyés à une usine de retraitement qui va séparer les produits de fission, l'uranium et le plutonium. Dans les produits de fission, on retrouvera également des produits à vie longue, un peu de plutonium qui n'a pas été extrait et des transuraniens type américium ou curium. Le plutonium extrait dans cette usine de retraitement peut être recyclé soit dans les réacteurs à eau pressurisée (mais c'est discutable économiquement), soit dans les réacteurs à neutrons rapides. L'UO₂ qui sort des usines de retraitement peut être recyclé, ré-enrichi, et repasser dans le cycle du combustible.

Nous allons considérer, en les regardant un par un, les domaines qui posent des problèmes au point de vue des effluents et des déchets. Je vous ai déjà signalé les problèmes liés aux stériles de mines. Quand on passe ensuite aux usines de transformation, la conversion en UF₆, l'enrichissement de l'UF₆ et sa reconversion en UO₂ posent des problèmes assez mineurs. On trouve quelques déchets dans la fabrication des éléments combustibles. Dans les réacteurs nucléaires en fonctionnement normal, les effluents sont faibles et bien contrôlés. Les déchets dits "technologiques" proviennent soit de la purification des eaux primaires du réacteur, soit des problèmes de décontamination des matériels des réacteurs eux-mêmes.

En restant dans les généralités, ce qu'il faut retenir, c'est que, hors accident de réacteurs, l'essentiel de la radioactivité va se trouver dans les éléments combustibles irradiés ou dans les usines de retraitement qui vont justement extraire les produits de fission très actifs créés lors du passage en réacteur. C'est là que nous allons avoir les problèmes essentiels d'effluents et surtout de déchets.

Dans une usine de retraitement, les éléments combustibles, ces espèces de tubes qui contiennent l'UO₂, après passage dans le réacteur, vont être cisailés. L'oxyde va ensuite être dissous ce qui sera la source d'effluents gazeux radioactifs importants : iode, xénon, etc... Uranium, Plutonium et produits de fission en solution liquide vont ensuite être séparés soit dans des mélangeurs décanteurs, soit dans des tours d'extraction. Une première étape retire les produits de fission, l'essentiel par conséquent des produits radioactifs à vie courte et une deuxième étape effectue la séparation entre l'uranium et le plutonium. A partir de là, on va élaborer les produits récupérables, l'oxyde de plutonium et l'oxyde d'uranium, et il restera les produits de fission sous une forme liquide que l'on stockera dans des cuves à double paroi, puis que l'on transformera en verres de façon à les mettre sous une forme qui soit la plus stable possible vis-à-vis de l'environnement.

Dans les usines de retraitement, les cuves de stockage de produits de fission conservent l'essentiel de la radioactivité qui a été extraite. Les Américains ont eu des difficultés parce que, pressés par le temps, juste après la guerre, ils ont stocké ces produits de fission dans des cuves simples à une seule paroi en acier ordinaire et ils ont eu quelques fuites faibles mais actives. La question de la reprise de ces produits de fission dans ces cuves aux Etats-Unis est un problème tout à fait sérieux. En France, comme on a eu le temps d'étudier les techniques, ce sont des cuves avec double enveloppe, en inox, qui sont utilisées et qui n'ont jamais donné de problèmes jusqu'à présent. Elles ne sont utilisées qu'à titre transitoire, puisque les produits de fission liquides ou légèrement pâteux vont être repris, puis fondus à haute température avec des agents

de calcination pour donner des verres. Après avoir été mis sous cette forme, les déchets sont contenus d'une manière sûre pour des centaines d'années, les taux de lixiviation de ces verres étant très faibles. Toutefois, ce serait insuffisant pour retenir la radioactivité pendant les périodes géologiques de plusieurs centaines de milliers d'années. D'où la nécessité de conserver ces verres dans des systèmes géologiques qui puissent assurer que la radioactivité résiduelle ne remontera pas dans la biosphère, soit dans des massifs de granit qui ne doivent pas être fissurés, soit dans des dômes de sel mais dont on doit être sûr qu'il n'y aura pas pénétration d'eau pendant des durées géologiques, soit dans des systèmes argileux qui assurent une très bonne protection et peuvent être autocolmatants, ou enfin, solution intermédiaire, dans des schistes argileux.

Impact de la radioactivité sur l'homme

Si vous n'êtes pas un spécialiste, la seule chose que vous ayez à retenir, au point de vue action des rayonnements sur vous-même, est : quelle dose en "sievert" ai-je subie ou vais-je subir? Cette unité donne un équivalent de dommage pour l'homme tenant compte de la nature du rayonnement et de la zone du corps intéressée. Ce qui est important, c'est que cette unité, le Sievert, équivalent à 100 rems, a été définie à la suite de travaux de milliers de savants, de biologistes, d'épidémiologistes, de façon à donner l'équivalent global de l'action sur l'homme des rayonnements sous n'importe quelle forme.

Vous concevez qu'une même quantité d'énergie délivrée dans un tissu par des rayons gamma, rayonnement électromagnétique pénétrant, ou par des rayons alpha qui sont des particules et sont arrêtés en une fraction de millimètre, ne vont pas avoir les mêmes effets. De même, cette même énergie délivrée dans le foie n'aura pas la même action que si elle atteint un muscle de la jambe.

Si l'irradiation est consécutive à l'absorption de produits radioactifs, on peut définir, de même, une irradiation induite, la

vie durant, en sievert, qui tient compte de la période radioactive, du composé et du métabolisme de celui-ci dans le corps, c'est-à-dire de ses zones de fixation et du temps moyen qu'il séjournera dans le corps avant d'être éliminé.

Nous sommes soumis depuis toujours à une radioactivité naturelle tant externe qu'interne. Suivant les régions où vous vivez en France, vous êtes irradiés de 1 à 3 milli-sieverts/an. Dans certaines régions de l'Inde ou de Madagascar, l'irradiation naturelle peut dépasser 10 milli-sieverts/an. A l'autre bout de l'échelle, vous trouvez la dose létale, correspondant à une probabilité de mort de 50%, d'environ 5 sieverts. Disons, qu'entre 4 sieverts et 8 sieverts, suivant votre complexion et les traitements qu'on vous fera, vous vous en sortirez ou pas : au-delà de 10 sieverts, vous mourrez dans un délai de quelques jours à quelques semaines.

Passée cette période critique, le risque devient celui de toute irradiation forte c'est-à-dire essentiellement un risque de cancer, qui est très comparable à celui de bien d'autres sources de notre environnement. Ce risque est de l'ordre de 1 % par sieverts reçus; or, nous avons tous, indépendamment de tous rayonnements, environ 22 chances sur 100 de mourir d'un cancer. Ce chiffre a augmenté au cours de ce siècle essentiellement à cause de l'allongement de la durée de vie. Avec une dose d'un sievert, ce qui est une dose énorme, vos chances d'avoir un cancer vont passer de 22 % à 23 %, c'est-à-dire que même si vous êtes fortement irradié comme l'a été la population près de la zone de l'accident de Tchernobyl, vos risques de cancer vont être peu modifiés. Il n'est pas sûr que l'on puisse, par des études épidémiologiques sérieuses, mettre en évidence une influence de l'accident de Tchernobyl sur les populations voisines, cette influence se confondant avec le bruit de fond.

Les réglementations internationales de la C.I.P.R.* recommandent une irradiation aussi faible que possible et ne dépassant pas 5 milli-sieverts/an pour la population - proche de la fluctuation de l'irradiation naturelle - et 50 milli-sieverts/an pour les travail-

* C.I.P.R. : Commission Internationale de Protection Radiologique

leurs professionnels. Pour la population, une des sources d'irradiations les plus fortes dont on ne s'est aperçu que récemment est due au radon dégagé naturellement et piégé dans des maisons très bien protégées au point de vue thermique et donc à faible renouvellement d'air. L'économie d'énergie est une idée solide, économiquement et écologiquement saine. Mais il faut savoir qu'elle a des effets pervers qui touchent des dizaines de milliers de personnes à des niveaux de dose de plusieurs dizaines de fois supérieures aux limites admises par la C.I.P.R.

Les Suédois, qui sont particulièrement intéressés par le problème (très bon isolement thermique, sol en granit et murs en béton de granit) l'ont pris d'une manière tout à fait sérieuse. Ils sont, à l'heure actuelle, en train d'installer des échangeurs de chaleur dans ces maisons de façon à ce qu'on puisse avoir un renouvellement d'air plus important tout en gardant un isolement thermique honorable. De même, les études d'impact effectuées avant les travaux d'exploitation de nouvelles mines d'uranium montrent que de nombreuses sources naturelles, utilisées de tous temps, ont un niveau dépassant très largement les normes de radioactivité admises par la C.I.P.R.

De tout ceci, et sans entrer dans la discussion de l'influence des doses faibles de radioactivité, influence inaccessible aux études épidémiologiques les plus fines, il faut retenir que les normes retenues par la C.I.P.R. pour la population, proches de la fluctuation de l'irradiation naturelle, sont largement protectrices.

Effluents et déchets

Il s'agit maintenant de s'assurer, et c'est le rôle des autorités de sûreté et du Ministère de la Santé, qu'en aucun cas les rejets autorisés d'effluents, où les dépôts de déchets radioactifs au cours du temps, ne conduiront à une irradiation de la population supérieure aux normes retenues par la C.I.P.R. En ce qui concerne les effluents, nous avons vu que les usines de retraitement sont les

sources d'effluents radioactifs les plus importantes. Les chiffres relatifs à La Hague montrent que les rejets soit atmosphériques (iode, tritium, argon, xénon), soit liquides dans la mer (césium, strontium, transuraniens) sont facilement maintenus en-dessous des limites autorisées et donc sans conséquences pour l'environnement.

Le problème des déchets à longue durée de vie est le problème le plus fréquemment évoqué. On a l'habitude de classer les déchets en trois types de catégories :

a) Les déchets de catégorie A sont des déchets d'émetteurs bêta-gamma de faible et moyenne activité. Ils peuvent être actifs au moment de leur formation, mais la chance veut que si un composé est très actif, cela veut dire qu'il a une période faible, c'est-à-dire qu'il va avoir une décroissance rapide. Au contraire, les composés qui vont durer des milliers d'années ont une activité faible parce que sans cela ils ne dureraient pas aussi longtemps. On considère qu'au bout de 300 ans pratiquement, tous les déchets de la catégorie A ont une radioactivité négligeable et on va pouvoir banaliser les terrains de stockage, généralement en surface, utilisés pour ce type de déchets. C'est le cas du centre de l'Aube qui vient d'être choisi comme deuxième centre de déchets de surface en France et dont l'hydrologie est particulièrement sûre.

b) La catégorie B comprend des déchets de catégorie A mais dans lesquels il y a en plus des déchets alpha de longue durée, d'activité supérieure à 10-2 curies à la tonne pour les colis arrivant au stockage. Les modèles montrent qu'on peut les conserver en surface - ce qui est fait actuellement - mais que la possibilité de banaliser les terrains après environ trois cents ans n'est pas assurée. Par conséquent, ces déchets devront être déposés finalement dans un stockage en profondeur, un peu comme la troisième catégorie.

c) Catégorie C : ces déchets sont des déchets à la fois bêta-gamma de forte intensité et des déchets alpha de longue durée de vie comme l'américium, le plutonium et le neptunium. Ce sont ces déchets, en particulier ceux produits par les usines de retraitement, qui po-

sent le plus de problèmes et doivent être conditionnés de manière sûre puis stockés comme nous l'avons vu dans des dépôts géologiques profonds. Les quantités cumulées en l'an 2020 seront de l'ordre de 6.000 m³, ce qui est très compatible avec un seul stockage profond. Celui-ci ne sera choisi qu'après des études approfondies des différentes formations géologiques possibles. Mais les études déjà effectuées aux Etats-Unis et en Suède, comme les modèles étudiés en France, montrent que les risques de remontées de la radioactivité de ces déchets dans la biosphère, à un niveau dépassant les normes admises par la C.I.P.R., sont extrêmement faibles.

En conclusion

Je voudrais terminer en faisant un peu de philosophie. J'ai pris un certain recul par rapport à ces problèmes et souhaite placer les ordres de grandeur des risques en perspective. Il me semble évident que, dans l'ère nucléaire, le seul problème qui soit vraiment un problème grave est celui de la guerre nucléaire. Si on regarde les probabilités, chacun peut faire son estimation, on peut évaluer la demi-durée de vie de l'humanité sans guerre nucléaire à 50 ans (c'est un ordre de grandeur) - 800 millions de morts -. Cela veut dire que le risque mathématique est d'environ 6 millions de morts par an à intégrer sur une période d'un siècle. C'est quelque chose de complètement inadmissible.

Ensuite, on a les accidents des réacteurs nucléaires. On a, hélas, un très bon exemple puisque Tchernobyl représente l'accident nucléaire maximum en ordre de grandeur : 100 % des gaz, 16 % du césium et 3 ou 4 % des composés lourds type plutonium, américium ont été dispersés dans l'environnement par cet accident. Les estimations les plus vraisemblables indiquent qu'en dehors des 31 morts immédiats, il peut y avoir quelques milliers de morts par cancer dus à cet accident. Imaginez que vous ayez un accident nucléaire de réacteur "type Tchernobyl" tous les 30 ans, cela vous fait un risque mathématique de l'ordre de 150 décès par an, sensiblement inférieur à celui

d'autres sources d'énergie comme le charbon pour la même énergie produite.

Si vous regardez maintenant le problème des déchets de longue durée, on peut considérer que les risques sont quasi nuls en ce qui concerne la population et de quelques décès par an en ce qui concerne les Travailleurs du nucléaire.

On ne parlera jamais assez des risques d'une guerre nucléaire.

On doit poursuivre un très gros effort de sécurité sur les réacteurs nucléaires, tant en ce qui concerne les facteurs matériels que les facteurs humains. Le problème des effluents et des déchets est un problème important mais bien géré qui ne mérite pas l'émotion entretenue par les média à son sujet.

Claude FREJACQUES
Membre de l'Institut
Président du CNRS