

Optimisation de la gestion des déchets nucléaires et préservation des matières valorisables

Gérard DUCROS

1. RAPPELS SUR LES RADIONUCLÉIDES (PF ET ACTINIDES)

Il paraît utile de rappeler quelques notions sur les radionucléides et, en particulier, la période radioactive, afin de mieux comprendre la suite du texte. Les produits radioactifs disparaissent d'eux-mêmes selon une loi physique simple liée à leur « période » : leur radioactivité décroît d'un facteur 2 après une durée égale à cette période, et d'un facteur 1000 après une durée égale à 10 fois cette période.

Ce qui est moins connu et qui n'apparaît jamais dans les documents de ce débat, c'est qu'à **quantité identique** (en nombre d'atomes), les **radionucléides dont la période est la plus longue sont les moins radioactifs [1]**. Par exemple, à quantité identique :

- L'iode 131 (I131, période 8 jours) est 1000 fois plus radioactif que le césium 137 (Cs137, période 30 ans),
- Le Cs137 est 1000 fois plus radioactif que le plutonium 239 (Pu239, période 24000 ans),
- Le Pu239 est 105 à 106 fois plus radioactif que les isotopes de l'uranium naturel (U235 et U238).

En conséquence, en matière de gestion des déchets nucléaires, ce ne sont pas les radionucléides de période courte qui posent problème malgré leur très forte activité, puisqu'ils décroissent rapidement ; ce ne sont pas non plus ceux dont la période est similaire à celle de l'uranium, car leur radioactivité est alors très faible et équivalente à celle de la radioactivité naturelle. Ceux qui posent réellement problème sont ceux de période qualifiée « d'intermédiaire », comprise entre quelques centaines et quelques milliers d'années.

Dans la pratique, si on regarde plus en détail les principaux contributeurs à ces catégories, on va trouver les éléments suivants :

- Dans la catégorie des « **périodes courtes** » se trouve la majorité des PF, avec des périodes généralement comprises entre quelques jours et quelques mois, et quelques actinides du neptunium (Np238-239), du plutonium (Pu241) et du curium (Cm242-243-244). Seule une petite dizaine de PF ont une période supérieure à un an et seulement **deux d'entre eux, le strontium 90 (Sr90) et le Cs137**, avec une période respective de 28 et 30 ans, **sont les principaux contributeurs à la radioactivité des déchets sur le long terme [2]**. Toutefois, au-delà de 300 ans, leur radioactivité a décliné en dessous de la radioactivité naturelle du minerai d'origine qui a servi à fabriquer le combustible initial. On trouve également dans cette catégorie des produits d'activation des matériaux de structure, notamment le cobalt 60 (Co60) dont la période est de 5 ans.
- La catégorie des périodes nommée « **intermédiaires** », celle qui pose le plus de problème dans la gestion à long terme des déchets nucléaires, comprend en réalité peu de radionucléides, essentiellement le **Pu239** (période 24000 ans), le **Pu240** (période 8600 ans), l'américium 241 (**Am241**) de période 430 ans) et deux isotopes peu abondants du Curium (Cm245-246). Am241 est généré par la décroissance radioactive du Pu241 de période courte (14 ans). Ces radionucléides sont donc ceux sur lesquels il faut prêter le plus d'attention. Pour autant, **ils n'ont pas vocation à être insérés dans les colis de déchets**, mais à être consommés en tant que combustible, notamment dans les réacteurs de 4ème génération à neutrons rapides (voir plus loin).
- La catégorie **des périodes très longues** comprend tout d'abord les résidus miniers de l'uranium et du thorium. Ceux-ci n'ont pas été produits dans les centrales nucléaires mais proviennent naturellement du sol d'où ils ont été extraits. Elle comprend enfin quelques PF (tels que I129, Cs135 ...) et quelques isotopes supérieurs du plutonium (Pu242-244) et du curium (Cm247), qui sont très peu abondants.

2. GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS ET VALORISATION DES MATIÈRES

Dans le contexte d'une économie circulaire telle que préconisée par le code de l'environnement (article L541-1), se pose la question de la valorisation des matières radioactives. D'un point de vue éthique, les seules qui sont valorisables sont celles contenant des radionucléides pouvant être recyclés pour fabriquer de nouveaux combustibles. Cela exclut d'emblée les PF et autres produits d'activation des matériaux de structures, qui doivent être considérés comme les seuls déchets radioactifs ultimes. Les principales matières valorisables sont les isotopes fissiles [3] de l'uranium (U233, U235) et du plutonium (Pu239, Pu241) et les isotopes fertiles [4] du thorium (Th232) et de l'uranium (U238).

En priorité n°1, il faut considérer **les matières fissiles** car elles sont très peu abondantes dans la nature (seul l'U235 est présent dans la nature dans une proportion de seulement 0,7 % de l'uranium naturel, les 99,3 % restant étant de l'U238), ce qui réduit fortement les perspectives d'un nucléaire durable avec le parc mondial actuel de réacteurs à eau fonctionnant avec des neutrons thermiques. Cette valorisation passe nécessairement par le retraitement des combustibles usés afin d'en extraire le plutonium. **Il ne faut donc pas requalifier en déchets les combustibles usés.** Comme il a été souligné au chapitre 1, le plutonium est un combustible de tout premier ordre. Il serait donc insensé de le considérer comme un déchet, d'autant qu'avec sa période « intermédiaire » il serait l'élément le plus pénalisant pour la gestion à long terme de ces déchets.

Dans l'idéal, l'utilisation optimale du plutonium est en réacteur à neutrons rapides de 4ème génération, et ceci même « *en utilisant au plus tôt ce combustible après les opérations de retraitement* » pour valoriser davantage l'isotope Pu241. En effet, celui-ci est aussi fissile, mais il décroît rapidement pour générer l'Am241, lequel est un poison neutronique. L'utilisation actuelle du plutonium dans les réacteurs à eau sous pression (REP) du parc français sous forme de combustible mixte UO₂/PuO₂, dénommé MOX, est un « pis-aller » résultant du retard plus ou moins volontaire des pouvoirs publics à lancer la filière des réacteurs à neutrons rapides (arrêt « politique » de Super Phénix, mise en veille du projet ASTRID ...).

Les matières fertiles sont la priorité n°2, notamment dans la perspective du déploiement des réacteurs de 4ème génération, capables de fonctionner en surgénération et de recycler l'ensemble de l'uranium et ou du thorium présents dans la nature. En effet, ne soyons pas naïf, si le nucléaire mondial a connu un passage à vide après l'accident de Fukushima en 2011 (tout comme après 1979 suite à TMI-2 ou après 1986 suite à Tchernobyl), il est quasiment sûr qu'un redémarrage va s'enclencher. Cela commencera par la Chine, qui va sans doute devenir à court terme le premier producteur mondial d'électricité nucléaire, suivie probablement dans la foulée par l'Inde.

Dans ce contexte, il y a lieu de penser que personne n'est capable de prédire avec certitude si les ressources en uranium risquent de se tarir d'ici 20 à 30 ans ou à l'horizon de 100 ans. Mais ce qui semble sûr c'est que cela se produira dans cet intervalle de temps. **Il serait donc bien imprudent de requalifier en déchets nos matières fertiles, et notamment les stocks de plus de 300.000 tonnes d'uranium appauvri**, issus du procédé d'enrichissement de l'uranium, qui « *dorment sur des étagères* ». Avec le déploiement des futurs réacteurs de 4ème génération, ce stock ouvre la voie à une durabilité du nucléaire de plusieurs milliers d'années, sans même avoir besoin d'aller extraire de l'uranium et/ou du thorium dans les mines.

Que penser du thorium ? Dans cette perspective le cycle Th232-U233 associé aux réacteurs à sels fondus, constitue la voie privilégiée car la fission de l'U233 crée beaucoup moins d'actinides que la fission du Pu239. Pour autant, si ce cycle peut être très intéressant, en particulier pour l'Inde qui dispose de quantités importantes de thorium dans son sous-sol, la situation particulière de la France évoquée précédemment (disposant déjà de quantités très importantes d'U238 « *sur étagères* ») ne justifie sans doute pas de poursuivre les études nécessaires pour mettre au point cette filière prometteuse.

3. COMMENTAIRES SUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

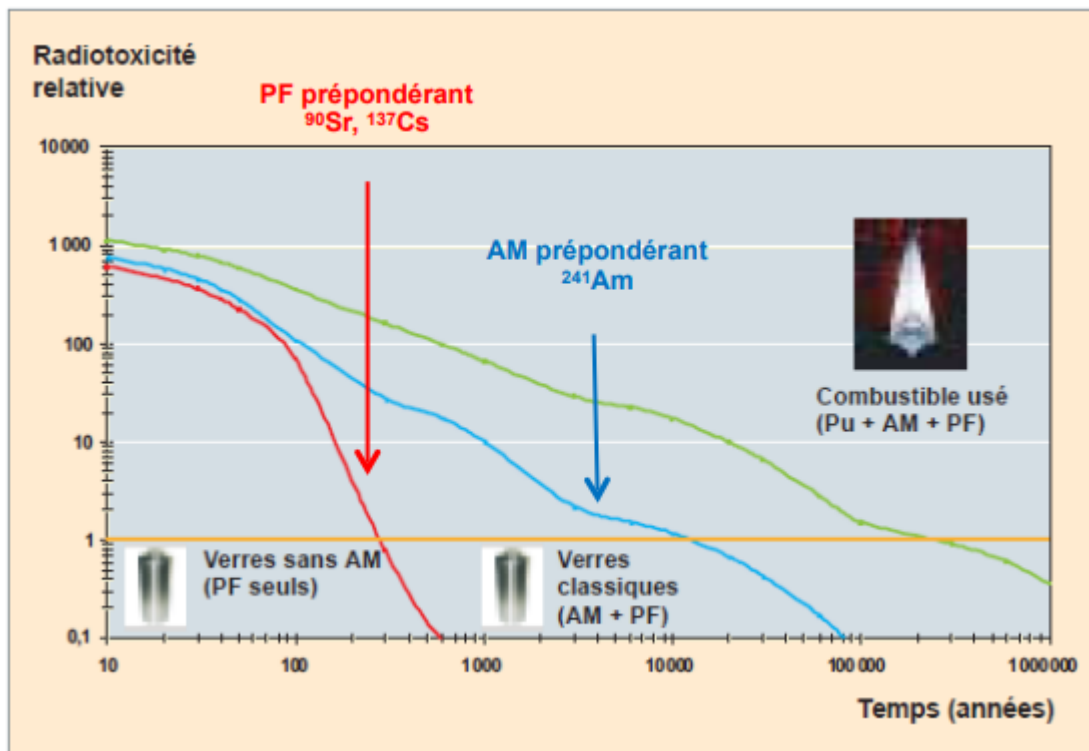
Concernant les déchets radioactifs, on distingue deux catégories principales suivantes :

- Les déchets de haute et moyenne activité à vie longue (HA et MA-VL) car ce sont les plus radioactifs (99,9 % de la radioactivité totale des déchets est concentrée dans cette double catégorie). Leur spécificité, liée à la forte activité et à la présence de radionucléides de période longue, impose une solution de stockage robuste, car elle engage les générations futures. Le projet de centre de stockage CIGEO fait débat et va cristalliser l'attention citoyenne bien au-delà du débat actuel de la CNDP¹.
- Les déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC) et de très faible activité (TFA) car, bien que ne concentrant que 0,3 % de la radioactivité totale des déchets, ce sont les plus encombrants. Ils mobilisent 91 % du volume total des déchets.

¹ CNDP : Comité National de Débat Public organisé dans le cadre de la préparation du 5ème PNGMDR.

3.1. Déchets radioactifs et projet CIGÉO

Les déchets HA sont les résidus hautement radioactifs provenant de la dissolution chimique des combustibles usés lors du procédé de retraitement. Ils sont incorporés dans une matrice en verre, puis conditionnés dans des conteneurs en acier (CSD-V pour Conteneur Standard de Déchets Vitrifiés). Ce conditionnement est très robuste dans le temps, garantissant la rétention de tous les radionucléides dans cette matrice vitreuse et inerte sur une période de temps de plusieurs milliers d'années [5]. Pour autant, comme indiqué précédemment, ces périodes de temps géologiques, qui inquiètent à juste titre un bon nombre de citoyens, masquent une réalité plus différenciée, comme l'indique la figure suivante.



Le trait horizontal de radio toxicité égale à 1 est un niveau de référence relatif correspondant à la radioactivité naturelle du minerai qui est à l'origine de ce déchet HA. En l'absence de retraitement, si l'on stocke le combustible usé tel quel dans CIGEO, la courbe verte montre bien qu'il faut environ 300.000 ans pour revenir au niveau de référence de la radioactivité naturelle, en raison de la présence du plutonium [6]. Mais les colis actuels ne contiennent pas de plutonium car il a été extrait lors du retraitement ; ils contiennent seulement les PF et actinides mineurs (AM). La courbe bleue, relative aux verres classiques contenant les AM et les PF, montre que la durée de retour au niveau de référence redescend à 10.000 ans environ en raison de la présence des AM et notamment de l'Am241. Enfin, la courbe rouge, relative à des colis dont le contenu est limité aux seuls déchets ultimes et non valorisables que sont les PF, **montre que la durée de retour au niveau de référence n'est plus que de 300 ans**, correspondant bien à 10 fois la période de Sr90 et Cs137 ; on revient alors à une **toute autre échelle de temps, qui impacte beaucoup moins les générations futures**.

Il est donc souhaitable d'extraire des combustibles usés, non seulement le plutonium, mais aussi l'américium (le CEA a fait la démonstration de sa faisabilité dans son programme de recherche sur la séparation poussée), et de le transmuter ensuite dans les futurs réacteurs de 4ème génération [7] ou dans des machines dédiées (accélérateurs). Bien sûr, pour les colis CSD-V déjà produits contenant des AM, leur stockage définitif dans CIGEO ne cause pas de souci en raison de la robustesse de leur conditionnement (sans même parler des deux autres barrières de confinement que seront la barrière ouvragée et la couche d'argile).

Les déchets MA-VL comprennent majoritairement les résidus métalliques (coques et embouts des gaines) ayant résisté à la dissolution chimique des combustibles usés lors du procédé de retraitement. Ils sont compactés, puis conditionnés dans des colis (CSD-C pour Conteneur Standard de Déchets Compactés). Comme pour les colis CSD-V, leur stockage définitif dans CIGEO ne pose aucun problème particulier.

Par contre, il existe également dans cette catégorie des déchets anciens issus d'opérations de traitement d'effluents liquides, qui ont été conditionnés dans des matrices bitumées. Sous l'effet de la radiolyse, ces déchets pourraient relâcher de l'hydrogène et induire potentiellement un risque d'incendie. Il est envisagé de les incinérer dans CIGEO moyennant des dispositions de sûreté spécifiques dont la robustesse reste à démontrer. Une des

voies explorée serait de colmater les alvéoles contenant ces déchets bitumés dès le début du fonctionnement de CIGEO afin d'éliminer le risque d'incendie. Ces déchets anciens, qui ne seront jamais valorisables, ne nécessitent pas de réversibilité [8].

3.2. Déchets FMA-VC et TFA

L'enjeu des déchets FMA-VC et TFA consiste essentiellement à réduire leur volume afin d'éviter ce que l'on pourrait appeler « l'occlusion intestinale ». En effet, le centre de stockage dédié aux TFA est déjà proche de la saturation et celui dédié aux FMA-VC le sera, mais à plus long terme.

Les **FMA-VC** représentent en volume 60 % de l'ensemble des déchets radioactifs. Ils sont majoritairement issus des opérations de maintenance et de démantèlement des installations nucléaires. Ce sont principalement des gants, vêtements, outils, filtres contaminés ou effluents liquides de décontamination ...

Ils ne contiennent que des PF ou produits d'activation de période inférieure à 31 ans (période limite des déchets à vie courte, incluant le Cs137). Pour autant, il est fort probable que la majorité d'entre eux ne soient pas contaminés par du Cs137, mais par des radionucléides de période plus courte, notamment le Co60. Dans ces conditions, ceux-ci verraient donc leur radioactivité décroître naturellement d'un facteur 1000 en seulement 50 ans.

Il serait donc **utile de disposer d'une meilleure caractérisation de ces déchets** (par exemple sont-ils caractérisés par spectrométrie gamma pour identifier et quantifier les principaux radionucléides, dont Cs137 et Co60 ?) afin d'évaluer :

- d'une part la proportion de ceux qui ne contiennent que du Co60 ou des radionucléides de période inférieure,
- d'autre part la proportion de ceux qui ne sont que de faible activité (inférieure à quelques centaines de milliers de Bq/g).

Les déchets FMA-VC remplissant ces deux critères pourraient ainsi être requalifiés en TFA en moins de 50 ans.

Les **TFA** représentent en volume 31 % de l'ensemble des déchets radioactifs. Comme pour les FMA-VC, ils sont majoritairement issus de la maintenance et du démantèlement des installations nucléaires et se présentent sous la forme de gravats, terres, déchets métalliques ou plastiques. Leur activité est par définition inférieure à 100 Bq/g (valeur très proche de la radioactivité naturelle de certaines régions granitiques), et souvent encore plus faible. Le rapport sur ce sujet du Haut Comité pour la Transparence et l'Information sur la Sûreté Nucléaire (HCTSIN), indique que la radioactivité d'un quart d'entre eux est même inférieure à 100 Bq/kg, ce qui est aussi la valeur moyenne de la radioactivité du corps humain [9].

De plus, comme pour les FMA-VC, il y a fort à parier qu'une proportion non négligeable de ces déchets soit majoritairement chargée en Co60, dont l'activité va décroître d'un facteur 1000 en 50 ans. Je pense notamment aux pièces métalliques, telles que par exemple les 90.000 tonnes attendues du remplacement des générateurs de vapeurs du parc EDF.

Se pose donc légitimement la question de la libération de ces déchets et de leur recyclage pour réduire l'empreinte de leur stockage, en particulier pour tous ceux dont la radioactivité n'est pas plus élevée que celle de chacun d'entre nous. Par excès de prudence, la France est le seul pays à ne pas envisager leur réutilisation en dehors du secteur nucléaire où ils ont été produits. Cela va à l'encontre du code de l'environnement qui préconise le recyclage des matières dans la perspective d'une économie circulaire et durable. Cet excès me fait aussi penser à l'évolution des contraintes posées par la sûreté nucléaire : une sûreté qui n'est pas capable de prendre du recul sur les véritables enjeux conduit souvent à des effets collatéraux désastreux.

Aussi, nous préconisons **la mise en œuvre des seuils de libération des déchets TFA, conformément à la directive européenne 2013/59/Euratom**. Je rappelle pour ceux que cela inquiète que les seuils de libération recommandés par cette directive pour les principaux radionucléides présents dans les TFA (Co60, Cs137 ...) est précisément de 100 Bq/kg ... valeur égale à celle du corps humain !

4. CONCLUSION

En guise de conclusion nous :

- Proposons de soutenir **la valorisation des matières radioactives**, en particulier du plutonium extrait des combustibles usés et de l'important stock d'uranium appauvri accumulé au fil des ans lors du procédé

d'enrichissement de l'uranium. En accord avec le code de l'environnement qui préconise d'utiliser au mieux les ressources naturelles, ces matières utilisées dans les réacteurs de 4^{ème} génération à neutrons rapides **ouvrent la voie à un nucléaire durable** pouvant étendre l'utilisation des ressources naturelles sur plusieurs milliers d'années, contre seulement quelques décennies dans la situation actuelle des réacteurs à eau du parc mondial.

- Sommes **favorables au projet de stockage géologique profond CIGEO des déchets HA**, compte tenu, notamment, de la robustesse des colis vitrifiés, avec le bémol toutefois que les **futurs colis HA ne contiennent que les produits de fission, déchets ultimes non valorisables** et qu'une solution pérenne soit trouvée pour les **déchets MA-VL bitumés**.
- Recommandons **d'améliorer la caractérisation des déchets FMA-VC et TFA** afin d'identifier et de quantifier avec plus de précision leur contenu en radionucléides. Pour les déchets FMA-VC, cela pourrait permettre d'en requalifier une part non négligeable en TFA sur une échelle de temps réduite de quelques décennies. Cela permettrait enfin de **recycler la majorité des TFA respectant les seuils de libération préconisés par la directive européenne 2013/59/Euratom**.

5. NOTES

[1] L'activité A d'une substance contenant un radionucléide, exprimée en Bq (c'est à-dire en nombre de désintégration par seconde), est définie par la relation suivante :

$A = 0,693 \times N/T$, où N est le nombre d'atomes contenu dans cette substance et T sa période. Pour deux substances ayant le même nombre d'atomes N et deux périodes différentes, c'est donc bien celle dont la période est la plus longue qui est la moins radioactive.

[2] La limite fixée à 31 ans des déchets « vies courtes » a été choisie pour y inclure ces deux PF Sr90 et Cs137.

[3] Les isotopes fissiles sont ceux qui subissent directement la fission nucléaire, productrice d'énergie.

[4] Les isotopes fertiles ne sont pas directement fissiles, mais ils se transmutent par capture neutronique en un isotope fissile (exemples : Th232 se transmute en U233, U238 se transmute en Pu239). Utilisés notamment dans les réacteurs de 4^{ème} génération, ils permettent de multiplier les ressources naturelles d'un facteur 50 à 100 en raison de leur grande abondance dans la nature en comparaison aux isotopes fissiles.

[5] Cette robustesse a pu être démontrée par les scientifiques du CEA en testant notamment des verres chargés en curium. Le curium, possédant des isotopes de période courte, donc à très forte radioactivité, permis de simuler avec succès en seulement quelques années le comportement du verre (défauts potentiels créés par l'impact des rayonnements) sur une très longue période, équivalente à plusieurs milliers d'années.

[6] On note que cette durée correspond bien globalement à 10 fois la période du Pu239, durée nécessaire à l'extinction de cet isotope.

[7] Le CEA a étudié cette possibilité, notamment en insérant l'américium dans des cibles spécifiques placées dans les couvertures fertiles périphériques du cœur (concept CCAM).

[8] L'impératif de réversibilité qui est imposé pour l'installation CIGEO pose également débat. Le fait d'imposer le stockage dans cette installation les déchets bitumineux pourra entraîner inévitablement des effets collatéraux que sont la complexité, le surcoût financier et peut-être au final ... l'inutilité !

[9] Cette radioactivité du corps humain d'environ 100 Bq/kg est due à la présence de l'isotope du potassium K40 dans nos os