



Figure 23 Das Kernkraftwerk Lingen/Ems

7.17.4 *Le Stockage des Déchets Radioactifs (-)*

Traduction en français: Edith Jacobsen et Romain Véziat

Chaque activité de la physique nucléaire engendre des déchets radioactifs. Une expérience dans un laboratoire, le diagnostic ou la thérapie médicale, mais aussi la recherche et le développement de nouvelles technologies pour l'utilisation de la physique nucléaire, en particulier le fonctionnement des centrales nucléaires, qui sont déjà mises en marche (voir sous-chapitre 7.17.3), sont autant d'activités entraînant ces rejets. Il en va de même concernant l'obtention des minerais qui contiennent de l'uranium ou la transformation en l'uranium suffisant pur et la finition aux nommés barreaux de combustible. Ces processus de la physique nucléaire se passant dans certains appareillages engendrent du matériel neuf ou le modifient de manière qu'il faut l'en retirer constamment, ou au moins pendant la maintenance régulière, pour pouvoir garantir la fonction originelle de ces appareillages. Les déchets qui en sont rejetés sont généralement très radioactifs. En outre, il est obligatoire de protéger l'environnement constamment et à toute épreuve contre le rayonnement radioactif qui

se produit dans cet appareillage. La housse de protection, autour de l'appareillage entier, est exposée à ce rayonnement radioactif pendant tout son fonctionnement et de ce fait, elle devient elle-même radioactive (au moins la couche la plus intérieure). Aussi, à chaque arrêt de production et à chaque démolition qui en résulte, des déchets radioactifs sont créés. Ces déchets sont généralement modérément radioactifs.

Il existe donc actuellement une quantité non-négligeable de déchets radioactifs dans le monde. Ils font suite à différentes erreurs commises par le passé, se produisant encore aujourd'hui et qui continueront à se produire, au moins dans un futur proche:

- Tout d'abord, nous pouvons citer les terrains contaminés par de la radioactivité sur les sites des lieux de recherche de physique nucléaire. Le site d'Hanford, situé dans l'état de Washington aux Etats-Unis, en est un exemple parfait. Il s'agit d'un terrain de $1,5 \cdot 10^3 \cdot km^2$ environ. Du plutonium y a été fabriqué depuis 1943 pour la production de bombes à fission nucléaire. Depuis quelques années un consortium de sociétés privées est chargé de dépolluer le terrain de manière à ce qu'il soit débloqué pour l'exploitation publique. Cette action coûte déjà $2 \cdot 10^9 \cdot US\$$ par an. Mais nous ne savons pas sous quelle forme les déchets qui en proviennent sont stockés ou éliminés.
- Ensuite, se pose le problème des sols et des plantes contaminés sur les sites d'essais des armes nucléaires. Comme exemple significatif nous pouvons indiquer l'atoll Mururoa, une île polynésienne inhabitée de $300 \cdot km^2$ au Sud du Pacifique. La France y a effectué, entre 1966 et 1996, pas moins de 188 essais nucléaires dont 41 dans l'atmosphère. L'île est donc une zone interdite encore aujourd'hui et aucune dépollution n'est prévue pour les années à venir. En plus, il est fort probable que dans des cheminées souterraines de cette île, de grosses quantités de déchets radioactifs soient stockées.
- De plus, de nombreux terrils sont contaminés par la radioactivité, aux abords des terrains d'exploitation de minerais contenant de l'uranium. Nous pouvons mettre en évidence le site de l'ancienne entreprise SDAG Wismut situé en Allemagne au sud de la Saxe et de la Thuringe. La multitude de sites d'extraction et de traitement, entre 1945 et 1990, a extrait environ $2,3 \cdot 10^5 \cdot t$ d'uranium. Par cette action $3,1 \cdot 10^8 \cdot m^3$ de terrils ont été contaminés et $1,5 \cdot 10^8 \cdot m^3$ de résidus ont été fabriqués. Ces activités ont été effectuées sur une surface d'env. $37 \cdot km^2$. Depuis 1990 la société d'état Wismut GmbH a démarré un travail de traitement et nettoyage sur ce terrain. Les frais engendrés jusqu'à présent (2010) s'élèvent à $6,2 \cdot 10^9 \cdot €$.
- Il y a aussi des déchets radioactifs stockés dans une manière inappropriée. L'ancienne mine de sel Asse II près de Wolfenbüttel en Basse-Saxe est un exemple parfait pour ce problème. Beaucoup de deches prétendus modérément ou moyennement radioactifs sont stockés la-bàs pendent les années 1967 à 1978. On sait aujourd'hui que 16.100 tonneaux en acier d'un volume de $0,2 \cdot m^3$ chacun sont stockés

dans cette ancienne mine dans des conditions partiellement chaotiques (voir Fig. 24). La plupart des tonneaux ne sont pas enregistrés, leur contenu exact



Figure 24 Tonneaux en acier remplis par des déchets radioactifs et stockés dans l'ancienne mine de sel Asse II à Wolfenbüttel en Basse-Saxe

n'est donc pas connu. On estime le contenu total en Plutonium dans ces tonneaux à environ $28 \cdot kg$. Aujourd'hui des entreprises travaillent sur un concept de récupération de tous ces déchets. L'administration de l'état estime les frais totales à $2 \cdot 10^9 \cdot Euros$ pour ce travail, d'autres experts estiment un montant jusqu'à $6 \cdot 10^9 \cdot Euros$.

- L'endroit où sont stockées toutes les armes nucléaires après leur exploitation militaire (en particulier les ogives explosives des missiles) est totalement inconnu du grand public. Il en va de même pour les armes qui ont été réformées au cours d'une modernisation des équipements ou pour les armes inutilisables à cause des accords de désarmement. Il y a, alors, de bonnes raisons de croire que ces déchets fortement radioactifs sont toujours entreposés dans des dépôts intermédiaires dont personne ne connaît ni l'endroit, ni la quantité.
- Nous sommes en droit de nous demander si les fabriques pour le retraitement des barreaux de combustible usés des réacteurs de fission nucléaire, actuellement en fonctionnement, stockent leurs déchets plus ou moins radioactifs d'une manière correcte et durable. Il s'agit en particulier des aménagements de La Hague en Normandie, de Sellafield à l'Ouest du Royaume-Uni, et de Majak et Tomsk en Russie. Il est d'ailleurs de notoriété publique que les opérateurs des sites normands et britannique vident une quantité considérable des liquides contaminés dans l'océan.

- Enfin les conditions de stockage des barreaux de combustible usés (pas encore mis dans des aménagements de retraitement) ne sont pas toujours clairement définies. Il faut prendre cette réalité très au sérieux. D'autant plus que dans la plupart des pays aucun aménagement de retraitement n'est plus en fonctionnement. Ainsi, en 2009, les gérants des réacteurs de fission nucléaire français (EDF) ont envoyé en Russie une partie importante (environ 13%) de leurs barreaux de combustible usés mais pas encore traités. Ils sont, actuellement, stockés à l'air libre au centre de la ville sibérienne de Sewersk (autrefois Tomsk).

Les procédés nucléaires se déroulent à une échelle graduée d'énergie $\geq 1 \cdot \text{MeV}$ tandis que les énergies typiques des réactions chimiques sont dans le domaine de $10 \cdot \text{eV}$ et les énergies atteignables par des méthodes conventionnelles du procédé se trouvent dans le domaine de $0,05 \cdot \text{eV}$. Par conséquent il n'est pas surprenant que jusqu'à aujourd'hui aucune possibilité n'ait été trouvée pour influencer, même légèrement, les procédés radioactifs de désintégration dans des déchets radioactifs, par des techniques conventionnelles de ce genre. La seule technique de gestion des déchets aujourd'hui existante consiste à stocker les déchets d'une manière contrôlée et à protéger l'environnement contre une contamination radioactive trop importante. Dans ce contexte le mot contrôlée veut dire:

- Le contenu de chaque conteneur stocké est précisément documenté.
- L'endroit de placement de chaque conteneur est bien documenté aussi.
- A tout moment chaque conteneur stocké peut être retiré de son endroit de stockage.

Cette démarche n'est pas une gestion des déchets radioactifs à proprement dit, mais seulement un report à l'avenir loin de la solution du problème. En plus tous les lieux de stockage définitif de déchets radioactifs, qui existent aujourd'hui, ne satisfont pas ces 3 conditions bien que ils soient à mon avis insuspensables.

La durée minimale pendant laquelle ces déchets peuvent ainsi être stockés d'une manière contrôlée et réversible résulte de la concentration des isotopes radioactifs dans ces déchets. Elle dépend fortement de la sorte d'appareillage qui les a produits.

(XXX: La partie du texte qui précise cet énoncé n'est pas encore disponible.)

En principe, on a la possibilité de trier des déchets qui contiennent exclusivement des isotopes radioactifs de courte vie et de les stocker séparément. Pour eux, une durée de stockage contrôlée de $20 \cdot a$ est suffisante. Les déchets restants qui contiennent également des isotopes radioactifs d'une durée de vie de $10^2 \dots 10^9 \cdot a$ doivent être contrôlés pour une durée illimitée et doivent être stockés sous blindage, séparés de l'environnement. Je considère, pour ma part, le choix très controversé de déposer

ces déchets dans des couches géologiques inappropriées (suffisamment profond sous la surface de la Terre) comme irresponsable. En effet, il s'agit d'un stockage incontrôlé et irréversible. De plus, je doute que l'on puisse pronostiquer de manière fiable le cheminement géologique exact d'un secteur choisi de la lithosphère sur une durée d'un ordre de grandeur de $10^5 \cdot a$ par exemple.

Le problème de la gestion ou du stockage définitif des déchets radioactifs est donc toujours irrésolu malgré l'utilisation technique et commerciale de l'énergie nucléaire depuis environ $60 \cdot a$. Les Etats Unis travaillent actuellement (2012) sur le planning d'un stockage pour les déchets radioactifs à Yucca Mountains/Nevada. Je connais pas les détails techniques de ce projet. Le coût global sera environ $58 \cdot 10^9 \cdot US\$$.

Cependant, une des rares alternatives envisageables au concept du stockage contrôlé est la *transmutation* nucléaire. Ce concept, qui a longtemps été remis en cause, est une hypothèse basée sur le fait qu'il n'existe (heureusement) que peu d'éléments pour lesquels un isotope radioactif a une grande longévité; donc une demi-vie de plus de 40 ans par exemple (voir la grille dans le chapitre 8.11). Il est important de noter qu'à quelques exceptions près, tous ces éléments sont des métaux. Pour l'instant, je ne suis pas en mesure de donner une explication plausible à cela. Je suppose, cependant, que c'est étroitement lié avec les règles similaires que suivent les principes de la structure constructive du revêtement des électrons et les principes de celle des noyaux atomiques. Ce lien devrait être bénéfique pour la réalisation technique de la séparation de ces éléments, qui sera abordée ci-après.

(Au cours du développement suivant, nous désignerons les **Eléments Radioactifs de Longue Durée** par les lettres ERLD.)

Il n'est donc pas insensé de réfléchir à une suite d'étapes pour le traitement des déchets radioactifs de la manière suivante:

1. Stockage intermédiaire des déchets primaires pendant un temps de déclin de $10 \cdot a$ par exemple. Cette étape sert d'abord de protection pour le personnel de commande des aménagements nécessaires pour les étapes suivantes.
2. Séparation chimique des déchets en une partie sans ERLD et le restant contenant des ERLD. Pour faire cela on peut vraisemblablement se servir des processus chimiques qui sont utilisés en métallurgie.
3. Stockage intermédiaire de la partie sans ERLD pour un autre temps de déclin de $30 \cdot a$ par exemple. Ensuite ces déchets peuvent être réutilisés ou déposés sans risque.
4. Irradiation de la partie contenant des ERLD par un rayon neutronique avec une énergie et une intensité appropriées (par exemple dans un réacteur nucléaire conçu spécialement pour cela). Au cours de cette étape les éléments contenant des ERLD sont transformés, pour la plupart, en d'autres éléments donc des éléments sans ERLD.

5. Remise du matériel irradié dans le site de stockage intermédiaire des déchets primaires.

Un centre de stockage définitif de déchets radioactif, au sens strict du terme, n'est plus envisagé dans ce cas.

Depuis ses débuts, ce concept a dépassé la phase de simple hypothèse. Aujourd'hui (2010) deux projets de recherche lui sont consacrés.

1. Le projet EUROTRANS (**E**uropean **R**esearch **P**rogramme for the **T**ransmutation of High-Level-Nuclear Waste), étudié par le KIT (**K**arlsruhe **I**nstitut of **T**echnology) en Allemagne.
2. Le projet MYRRHA (**m**ulti-**p**urpose-**h**ybrid **r**esearch **r**eactor for **h**igh-tech **a**pplications) étudié par le SCK.CEN (**s**tudie **c**entrum voor **k**eernenergie / **c**entre d'études de l'énergie **n**ucleaire) à Mol/Belgien ([35]). ^{‡‡}

Il reste maintenant à s'assurer que ce concept est possible dans la réalité technique, en particulier dans la mesure de la production en masse nécessaire, et à quel prix.

7.17.5 Einheiten für die Messung radioaktiver Strahlung (-)

Schon sehr bald nach der Entdeckung der natürlichen Radioaktivität wurde die Gefährdung des Menschen durch die von ihr ausgehende Strahlung erkannt. Damit stellte sich auch die Aufgabe, neben der rein physikalisch orientierten Quantifizierung dieser Strahlung auch das Ausmaß der Gefährdung zu quantifizieren, das entsteht, wenn ein Mensch in bestimmter Weise dieser Strahlung ausgesetzt wird. Die für diese Aufgabenstellung entwickelten Messgrößen werden wir nun behandeln.

Ich beginne mit der als *Aktivität* bezeichneten Größe: Sie gibt die absolute Anzahl der in einer i.a. makroskopischen Probe pro Zeiteinheit auftretenden radioaktiven Ereignisse an:

$$A = \frac{\text{Anzahl radioaktiver Ereignisse}}{\text{Zeiteinheit}} \quad (7.565)$$

Sie differenziert also nicht nach der Art und Anzahl der bei jedem einzelnen dieser Ereignisse emittierten Strahlungs-Teilchen und auch nicht nach deren Energie. Die SI-Einheit der Aktivität

$$\frac{1 \cdot \text{Ereignis}}{1 \cdot s} = 1 \cdot Bq \quad (7.566)$$

wird als *1 · Becquerel* bezeichnet und meist mit *Bq* abgekürzt. Die früher meist benutzte Einheit

$$1 \cdot \text{Curie} = 3,7 \cdot 10^{10} \cdot Bq \quad (7.567)$$

^{‡‡}Myrrha est une personnage de la mythologie grecque: Myrrha était la mère d'Adonis, qui était procréé par le père de Myrrha. Les dieux grecques ont gravement puni Myrrha pour cet crime. On peut se demander si ce nom Myrrha est un bon présage pour un projet si envisié (et pour les chercheurs concernés): Est-ce qu'on admirerait l'enfant et punirait les procréateurs?