

27/01/05

LE DEVENIR DES DÉCHETS NUCLÉAIRES

(MÉFIONS-NOUS DES NOTIONS CONVENUES !)

L'objet de cette note est d'expliquer les déchets nucléaires dans le contexte de notre environnement industriel et de mettre en garde contre des interprétations abusives des dangers de ces déchets qui tentent de repousser leur gestion dans une impasse.

Certaines propositions personnelles pourront soulever des contradictions qui seront bienvenues si elles sont techniquement justifiées.

I. Les déchets nucléaires, source de rayonnements

La découverte de la radioactivité naturelle, puis de la radioactivité provoquée par les réactions nucléaires, notamment lors du fonctionnement des réacteurs électronucléaires de puissance, ces découvertes ont à juste titre focalisé l'attention sur le danger que peuvent faire courir les radiations sur l'organisme et les activités humaines.

Le radium n'avait pas que des vertus comme on l'a cru un moment au début du siècle précédent, et tous ces éléments radioactifs créés de toutes pièces, dont certains à vie longue ou très longue, sous-produits de l'énergie nucléaire, sont venus constituer ce que l'on est convenu de nommer les déchets nucléaires, une nouvelle catégorie très spéciale de déchets provenant des activités humaines.

Sans entrer dans le détail, certains éléments émettent des radiations électromagnétiques comme l'est la lumière (rayons dits gamma), d'autres des électrons (dits rayons bêta), d'autres des particules plus lourdes, généralement des noyaux d'hélium (dits rayons alpha), quelques uns émettent des neutrons spontanément.



DIFFÉRENTS TYPES D'ÉMISSION

RAYONS	TYPE	ARRÊT	EFFET
BETA	ELECTRONS	1 - 5Cm Alumin.	IRRADIATION
GAMMA	ELECTRO-MAGNÉTIQUE	2-10Cm Plomb	IRRADIATION
ALPHA	NOYAUX D'HÉLIUM	FEUILLE PAPIER	CONTAMI--NATION
NEUTRONS		EAU, BÉTON	IRRADIATION

On parle d'irradiation lorsque la proximité de la substance « irradie » le sujet par projection de radiations, de contamination lorsque l'ingestion des substances peut provoquer des lésions dans l'organisme. L'ingestion accidentelle d'émetteurs bêta, par exemple, provoquerait également une contamination, mais les émetteurs alpha, du fait du trajet très court de leurs émissions, absorbées par une feuille de papier ou la peau, (voir plus loin), agissent surtout par contamination.

A la suite de Pierre et Marie Curie, la technique a mis au point des compteurs très sensibles capables de détecter chaque désintégration radioactive discrète. On appelle becquerel le nombre de ces désintégrations par seconde. Le becquerel est une mesure infiniment petite et les marchands de peur ont beau jeu d'agiter les centaines de milliers de becquerels pour nous faire croire que nous avons affaire à des radioactivités considérables. Par exemple, le corps humain irradie en moyenne 8000 becquerels du fait de certains éléments faiblement radioactifs présents dans notre squelette et dans notre organisme. On peut ainsi estimer la radioactivité présente dans une réunion électorale ! Ou dans un cimetière ! Un kilogramme de bordure de trottoir en granite émet environ 5000 becquerels. Il serait utile, soit dit en passant, de définir un multiple suffisamment grand du becquerel pour les applications industrielles pratiques et éviter de tomber dans des excès de précautions inutiles. Il semblerait qu'un multiple de 10 000 ou 100 000 serait approprié. A-t-on jamais mesuré une distance kilométrique en microns ?



LA PROXIMITÉ OU LE CONTACT DE MATIÈRES RADIOACTIVES

NE

**REND PAS
RADIOACTIF !**

Ces radiations au contact de la matière, peuvent créer des perturbations (ionisations) et provoquer des lésions dans nos cellules et dans nos gènes.

Ces lésions sont du même type que celles produites par les radiations « naturelles » plus ou moins fortes auxquelles nous sommes soumis, du fait de la radioactivité du sol, de certains radioéléments présents dans notre propre organisme, des rayons cosmiques.... De même, divers poisons, toxines, virus avec lesquels nous sommes en contact, produisent le même type de lésions.

Notre organisme est équipé pour se défendre contre ces agressions.

On compte qu'en moyenne nos quelque 100 000 milliards de cellules doivent réagir 200 millions de fois par seconde contre des attaques diverses comme dit plus haut. Ceci se traduit par des réparations du génome lésé, ou, si les dégâts



RASSURONS-NOUS !

- **ON SAIT MESURER LES MINUSCULES BECQUERELS**
- **LES NORMES de RADIOPROTECTION SONT TRÈS SÉVÈRES (Public : 2mSv/an)**
- **L'ORGANISME EST RADIORÉSISTANT : L'HOMME RÉSISTE BIEN À DES DOSES NATURELLES DE 10 A 100 FOIS CELLES REÇUES À PARIS (env. 2 mSv/an)**

sont trop importants, par la mort (apoptose) de la cellule, compte tenu de ce que notre patrimoine cellulaire se régénère environ une fois par trimestre.

Notre organisme est donc outillé pour réagir aux agressions diverses qui l'assaillent, parmi lesquelles les rayonnements ionisants émis par les éléments radioactifs, présents par exemple dans les déchets nucléaires.

Par exemple, le niveau de radiations auxquelles nous sommes exposés en Ile de France est de l'ordre de 2,5 millisieverts par an, unité qui traduit une certaine quantité d'énergie de radiation déposée dans notre organisme. Or il se trouve des terrains plus riches en uranium, comme les terrains primaires (granite), où ce niveau est double, de même en altitude à cause des rayons cosmiques moins arrêtés par l'atmosphère, sans que notre santé en pâtisse. Bien plus, certaines contrées sont connues pour avoir des niveaux jusqu'à 50 fois supérieurs (au Brésil, au Kérala, au bord de la mer Caspienne...) et les populations qui y vivent ne donnent pas de signes de maladie des rayons. Autrement dit, notre organisme peut s'adapter à des taux de rayonnement relativement élevés. Ceci est important, car il n'est pas juste de dire, comme parfois, que le dommage causé aux faibles doses, à l'organisme par les rayonnements est proportionnel à la dose reçue, sans seuil de dangerosité. L'expérience montre, du fait de la propriété des cellules de se régénérer, qu'il existe bien un seuil de radiations sous lequel un organisme sain ne subit pas de dommage. Ce « seuil » est de l'ordre de 100 millisieverts, soit 50 fois la dose de radiation naturelle reçue généralement en France. Par précaution, il est d'usage de diviser cette dose par deux ou plus dans le cas de grossesse ou d'organismes sensibles aux radiations.



Les effets des radiations

- * Dose mortelle (en 1 fois) 6 000 - 8 000 millisievert (mSv)
- 50% Chances de survie 4000 mSv en une fois

- Sans séquelles directes (*) 100 - 200 mSv en une fois
- Radiation naturelle 2 - 10 mSv/an
(Certaines contrées 100 à 300 mSv/an)
- Impact médecine 0.5-1 mSv/an (pays développés)
- Impact industrie/nucléaire 0,02 mSv/an

- Dose admissible travailleurs 50 mSv/an, proposé : 20 mSv
- Dose admissible public 5 mSv/an, proposé : 1 mSv

(*) Au dessus de ces doses, apparition des premiers symptômes (et légère augmentation des risques de cancer ou leucémie dans les 20 années suivantes).



**AUX FAIBLES DOSES
(Moins de 100 mSv/an)
L'EXTRAPOLATION VERS ZÉRO
DES RELATIONS LINÉAIRES
(QUADRATIQUE OU LINÉAIRE SIMPLE)
SANS SEUIL
POUR ESTIMER LES CAS DE
CANCERS**

N'EST PAS RÉALISTE

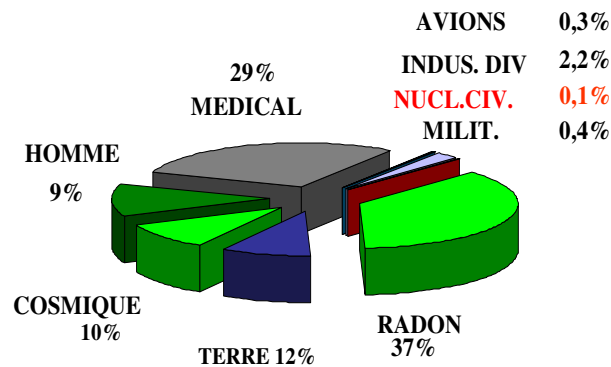
Cette loi linéaire sans seuil a été conçue pour mettre en place une radioprotection de larges populations. Elle n'est pas destinée au calcul du nombre de personnes qui subiraient des conséquences négatives de faibles doses.

En revanche, au-dessus de 200 millisieverts, soit 100 fois le taux de radiations de la région parisienne, les dommages causés à l'organisme sont à peu près proportionnels à ces fortes doses. On mesure par ces chiffres la grande marge de sécurité qui heureusement nous protège des dommages potentiels des radiations.

En pratique, les radiations naturelles constituent la majeure partie de l'irradiation des populations. Les pratiques médicales en rajoutent en moyenne un tiers en plus et l'industrie nucléaire ne contribue que pour 1 à 2 % supplémentaires. Ce ne serait que dans des cas accidentels très rares que des doses significatives pourraient être reçues, comme lors et aux environs de

l'accident de Tchernobyl (les doses ayant été reçues en France, contrairement à certaines assertions, n'ayant pas été de nature à causer des lésions au public).

SOURCES DE RADIOACTIVITÉ



« Radon » : gaz radioactif naturel présent dans tous les pays à des teneurs très variables suivant les lieux, leur ventilation et les circonstances météorologiques.
 « Homme » : la radioactivité du corps humain est due au potassium et au carbone 14 contenus dans le corps (env. 8000 Bq).

II. Caractéristiques principales des déchets nucléaires

A ce niveau, il est nécessaire de faire intervenir un certain nombre de facteurs pour bien appréhender le problème des déchets nucléaires :

- la durée de vie ou période des radioéléments considérés. La période est le temps nécessaire pour que les radiations émises décroissent de moitié. Au bout de 10 périodes, l'activité ne sera plus que le millième de l'activité d'origine. Cette propriété des éléments radioactifs de « décroître » dans le temps est fort importante. Des éléments stables, comme le plomb ou le mercure, resteront toujours aussi toxiques dans le temps, mais pas les produits radioactifs. La période peut varier de quelques fractions de seconde à plusieurs milliers, voire millions d'années, mais il est important de voir que plus la période est grande et plus inversement, l'émission radioactive est limitée. Un radioélément de période très longue sera peu radioactif, et donc potentiellement moins dangereux, qu'un élément de période plus courte. On voit ici l'élément fallacieux du slogan qui

mentionne les déchets que nous réservons aux générations futures : c'est



RASSURONS-NOUS !

- **LONGUE VIE ----> FAIBLE RADIOACTIVITÉ**
 - **10 PÉRIODES (demi-vies) -----> ACTIVITÉ 1/1000**
 - **IODE 131 : 8 JOURS**
 - **mais IODE 129, 17 MILLIONS années**
 - **CHACUN DE NOUS ÉMET 8000 BECQUERELS**
 - **(1 Bq = 1 ÉMISSION par SECONDE, MINUSCULE)**
- A CAUSE du POTASSIUM 40 de PÉRIODE 1,4 Milliards D'ANNÉES**



LES AUTRES DÉCHETS

- **LES DÉCHETS TFA (T. FAIBLE ACTIVITÉ)**
- **LES DÉCHETS MINIERES ('STÉRILES')**
- **TRITIUM ET DÉCHETS TRITIÉS (IMPACT TRÈS FAIBLE)**
- **EFFLUENTS LIQUIDES ET GAZEUX (IMPACT QUASI-NUL)**

Les déchets miniers représentent des volumes de stériles importants, renfermant des traces d'uranium naturel, lequel émet par désintégration radioactive, un phénomène naturel, des traces de gaz radon, qui a une très courte période et qui lui-même se désintègre en éléments solides. On se protège donc des stériles en les recouvrant de sol comprenant une couche d'argile imperméable qui retient les émanations de radon jusqu'à ce qu'il se soit transformé en éléments solides, qui sont piégés.

Le tritium est un gaz léger, émetteur bêta « mou », peu pénétrant, qui se forme au cours des réactions nucléaires. Sa période est de 12 ans environ (?), et il est peu nocif, mais il se propage facilement dans l'organisme et dans l'environnement. Les déchets contenant des traces de tritium doivent donc être confinés dans une enveloppe imperméable, et les effluents tritiés issus du retraitement des combustibles irradiés sont envoyés en mer, qui est en soi une énorme réserve de tritium extrêmement dilué, où ce tritium ira se diluer et

finalement « s'éteindre » par désintégration. A noter que l'énergie de fusion sera génératrice de quantités importantes de tritium dont il y aura lieu de se préoccuper le moment venu.

Les effluents liquides issus des différentes opérations de l'énergie nucléaire sont soigneusement collectés, concentrés et transformés en déchets solides. Les distillats de très faible activité sont rejetés après contrôle in fine dans la mer qui est elle-même un réservoir naturel gigantesque de très faible radioactivité, où ils verront leur radioactivité décroître naturellement avec le temps, puis disparaître.

Les effluents gazeux sont essentiellement des produits de fission gazeux contenus dans les éléments combustibles irradiés : deux gaz chimiquement inertes, le krypton et le xénon, que l'on laisse disparaître par décroissance dans l'atmosphère, l'iode, gaz au contraire réactif, mais heureusement à l'état de traces, que l'on piège pour éviter qu'il ne cause, par affinité, des dommages aux organismes vivants, par ex. en se fixant sur la glande thyroïde, et dont les traces non piégées sont rejetées en mer, qui est en soi, encore, un gigantesque réservoir d'iode très faiblement radioactif qui se forme par l'effet des rayons cosmiques et dont la concentration reste faible et stable par décroissance naturelle.

Nous avons déjà mentionné le radon, issu de l'uranium, et le tritium, sous-produit des fissions nucléaires.

La technique de protection contre les déchets nucléaires est le **confinement** dans des configurations stables qui les empêchent de migrer pendant leur période radioactive, d'être dissous dans l'eau, se répandre dans le milieu ou dans des nappes phréatiques. Il s'agira pour les déchets « A » de coques de béton faites pour durer au moins 300 ans, pour les déchets « B » de vie longue, de containers soudés dans des coques de béton et pour les déchets très actifs à l'origine et à vie longue, dits déchets « C », d'incorporation dans une masse de verre à l'intérieur d'un container inox soudé. On verra que pour ces derniers on compte sur une rétention en place de l'ordre de 10 000 ans avec les précautions prises.

*Quels sont les volumes considérés ? Contrairement à des idées reçues et diffusées par certains médias, les volumes des déchets nucléaires sont très faibles, même en tenant compte de leur système de protection, en regard des déchets industriels qui nous envahissent. Ceci tient au fait que la fission nucléaire nous fournit une densité d'énergie plusieurs milliers de fois plus grande que les réactions chimiques de combustion auxquelles nous sommes habitués, il faut peu de matière pour fournir beaucoup d'énergie, donc les déchets produits sont également en volume plus limités. De plus, l'industrie nucléaire est une industrie moderne qui a donné la priorité à la sûreté depuis l'origine, et où le confinement est une règle d'or. Il devrait en être de même

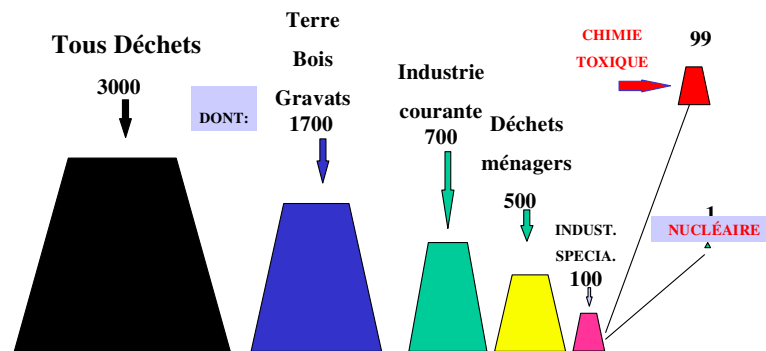
pour le reste des déchets industriels qui s'inspireront des techniques nucléaires au fil du temps.

Il faut d'ailleurs noter que les déchets nucléaires dont on parle toujours, ceux à vie longue et radioactivité grande à l'origine, et qui cumulent la radioactivité de plus de 90 % de tous les déchets nucléaires confondus, ne représentent en volume que 1 à 2 % de tout le volume des déchets nucléaires, et de l'ordre du millième seulement du volume des déchets chimiques toxiques actuels dont il devient urgent de s'occuper dorénavant.



1-63

DÉCHETS EN FRANCE (Kg/HAB/AN)



DÉCHETS en FRANCE

- **DÉCHETS CHIMIQUES très toxiques** ~1 000 000 m³/an
(Décharges déchets spéciaux de classe 1)
- **DÉCHETS NUCLÉAIRES** ~ 35 000m³/an
- **Dont: Déchets vie courte « A »** ~30 000m³/an
(Stockage en surface)
- **Dont: Déchets à vie longue « B »** ~ 1 500 m³/an
(Stockage profond)
- **dont : Déchets à vie longue, très radioactifs pendant ~3000 ans,actifs "alpha" ensuite * « C »** ~120 m³/an
- * Loi du 30/XII/91 : Voies étudiées : Stockage souterrain, entreposage en surface, séparation et transmutation

Les chiffres que nous donnons en termes de déchets nucléaires, pour simplifier notre exposé, s'entendent pour une industrie nucléaire établie du genre de ce qui se passe en France, où les matières ayant servi dans les réacteurs, sont retraitées et recyclées pour réutilisation : c'est le seul moyen de faire pour une industrie nucléaire durable. Tous les pays qui envisagent de s'équiper à terme en feront autant.

Ajoutons que l'industrie nucléaire actuelle, aussi performante soit-elle, en est encore à ses débuts. Nous avons tous entendu parler des réacteurs « rapides » dont Superphénix est un prototype, outrageusement arrêté pour des considérations partisans : les réacteurs du futur vont être en mesure de fournir davantage d'énergie tout en produisant moins de déchets que les réacteurs de la génération actuelle, notamment moins de déchets du type « A » dits à vie courte, qui sont la masse la plus importante des déchets d'une radioactivité notable. Bien mieux, les réacteurs à neutrons rapides ont la propriété de transformer en énergie des éléments radioactifs à vie longue, considérés jusqu'à présent comme déchets, une manière d'incinérer ces déchets.



FILIÈRE RAPIDE : AVANTAGES

- **BRÛLER TOUT L'URANIUM,
(Naturel, Appauvri, Recyclé)**
- **RECYCLER TOUT LE
PLUTONIUM (Civil, Militaire)**
- **ENRICHISSEMENT INUTILE**
- **BRÛLER ACTINIDES MINEURS
AVEC LE Pu → ÉNERGIE**

III. Le stockage des déchets nucléaires

Venons-en enfin au stockage des déchets nucléaires et à la manière de les rendre inoffensifs pour l'environnement.

- Les déchets de très basse activité sont constitués en bonne partie par des rebus de démantèlement d'installations désaffectées. En France, jusqu'à présent, on ne récupère pas certains produits (métaux valables, etc.) après les avoir dûment décontaminés, et les recyclant dans l'industrie, comme cela se fait en RFA, Belgique et autres pays. Cette pratique de recyclage, intelligente au demeurant, sous-entend des contrôles très stricts pour éviter toutes dérives. La France sous l'autorité de l'ANDRA (Agence

Nationale des Déchets Radioactifs) a ouvert dans l'Aube à Morvilliers un site de stockage des déchets de faible activité sécurisé et garanti contre les infiltrations. Ce site est capable de recevoir les déchets de faible activité du programme français actuel et de son démantèlement.



L'ANDRA

- **EN France, L'ANDRA (EPIC) EST EN CHARGE DES DECHETS FINALS**
- **L'ANDRA VIT DES TAXES SUR LES COLIS A STOCKER, PAYEES PAR LES PRODUCTEURS.**
- **ANDRA REPERTORIE, CONTRÔLE LES COLIS, LES RECONDITIONNE AU BESOIN.**



Bennes destinées à la collecte des déchets TFA, triés par nature (gravats, incinérables et divers)

- Les déchets radioactifs « à vie courte » sont également stockés par l'ANDRA dans un site de l'Aube, prévu spécialement à cet effet. Les colis sont disposés dans des silos parallélépipédiques, noyés dans du béton maigre et recouverts de couches ouvragées imperméables et drainés avec contrôle d'activité des écoulements éventuels pour éviter toute contamination de la nappe phréatique. Le Site de l'Aube est prévu pour recevoir les déchets du type « A » pour le programme nucléaire actuel français et au-delà. Théoriquement, au bout de 300-400 ans, le site devrait pouvoir être déclassé et rendu à la nature par absence de radioactivité.

Il est utile de signaler que les colis divers sont dûment répertoriés selon leur origine, leur composition, la date du dépôt, etc. de telle sorte que l'on connaît l'historique des déchets.



Gravillonnage des colis de déchets 'A' au Centre de Sauternes

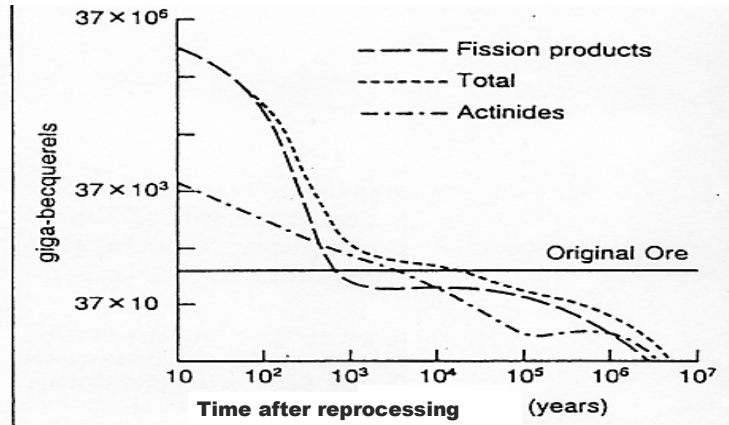
* Restent les déchets à vie longue « qui posent problème », aux dires des médias et du public.

Il s'agit essentiellement de trois types de déchets :

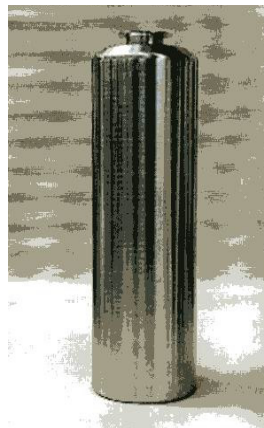
- 1. Les déchets « C », de forte activité initiale, très concentrés, une « bouillie » vitrifiée de « produits de fission » formés lors du fonctionnement des réacteurs, avec lesquels on trouve en petites quantités (environ 10 %) des éléments à vie longue ou très longue appelés « actinides », comme uranium, plutonium, américium, neptunium, curium. Ces actinides sont généralement des émetteurs alpha, parfois de neutrons spontanés. Leur période peut être longue ou très longue : la période du plutonium le plus courant, dit Pu-239, est de 24 000 ans, il faut donc « patienter » un ou plusieurs millions d'années pour que la radioactivité s'éteigne. Mais il faut bien voir que ces éléments, émetteurs alpha pour leur grande majorité, seront nuisibles par ingestion et non par irradiation. La belle affaire, dira-t-on ! Le plomb ou le mercure, qui sont stables (ou de période infinie), seront également nuisibles par ingestion. Le plutonium est-il plus ou moins dangereux que le mercure ? Cela dépend des cas, l'affaire n'est pas facilement tranchée, car le mercure est bien plus labile et réactif que le plutonium. Les victimes japonaises de Minamata sont malheureusement là pour en témoigner.



NIVEAU DE RADIOACTIVITÉ avec le TEMPS



Above: The radioactivity of high-level waste declines steadily over time, most dramatically over the first hundreds of years. Eventually the radioactivity level will be lower than that of the natural uranium ore from which the spent fuel originally came. The graph shows the levels of radioactivity in waste products for one tonne of fuel and its originating ore bod.



La concentration de ces actinides vitrifiés dégage une quantité de chaleur relativement importante. C'est pourquoi on stockera les colis en attente

dans des puits ventilés pendant environ 50 ans, pour les laisser refroidir et éviter que la chaleur dégagée en sous-sol, difficile à évacuer, ne « cuise » le substrat environnant, p. ex. l'argile, lui faisant ainsi perdre ses propriétés d'adsorption recherchées.



La Hague
Entreposage
des déchets
vitrifiés

Les produits de fission également présents en majorité dans la masse vitrifiée sont de vie courte, sauf une petite dizaine d'éléments de vie longue, mais peu radioactifs, que l'on peut négliger en première approximation, en regard des « actinides », leur toxicité étant bien moindre que pour ces derniers.

La vitrification de ces déchets de forte activité initiale et à vie longue pour une part, est un procédé mis au point en France, donnant une masse particulièrement inaltérable, résistant remarquablement à la corrosion par l'eau, même chaude. Les verres romains, les obsidiennes volcaniques sont de bons exemples de produits inaltérables ayant traversé les siècles et même les millénaires, nous autorisant à pouvoir compter sur la durabilité des stockages envisagés.

- 2. On aura également des éléments de structure qui ont été contaminés par les actinides (tuyaux, pompes, etc.). (Déchets « B »). Ils sont relativement aux premiers, peu radioactifs et ne dégagent pas de chaleur. Ces éléments seront compactés et bétonnés dans des containers inox soudés.

- 3. Enfin, des éléments combustibles usés contenant uranium, plutonium, actinides, produits de fission... que pour diverses raisons on ne juge pas utile de recycler et dont on souhaite se débarrasser. Il est prévu d'inclure ces éléments dans des containers métalliques soudés. Ces éléments devront être laissés à refroidir, eux aussi, avant stockage en profondeur, par ex. en les laissant séjourner sous eau en piscine.

Ces trois types de déchets représentent, comme dit plus haut, en volume, un très faible pourcentage du volume total des déchets nucléaires (de 10 à 20 %), lesquels, on ne le dira pas assez, sont eux-mêmes un faible pourcentage (environ 1%) des déchets chimiques toxiques qui s'accumulent dans notre biosphère. Ce sont ces déchets à vie longue, selon les détracteurs, « qui menacent les générations futures ».

Quelles sont les solutions préconisées pour ce type de déchets ?
Leur volume étant faible, un entreposage provisoire est toujours possible, même si ce n'est pas souhaitable de différer les solutions.

La solution que nous propose la Nature par ses « analogues » est le stockage géologique à l'abri des bouleversements tectoniques et des infiltrations d'eau. L'**argile** est l'un des substrats préférés, pour ses propriétés adsorbantes, notamment en milieu sans oxygène, et pour sa tendance à se refermer sur les colis par fluage.



The picture shows a piece of wood from a 1.5 million year old forest. The find was made in Dunarobba, Italy, where some twenty trees had been buried in the clay. The wood was prevented from decaying by the insulating and protective properties of the clay.

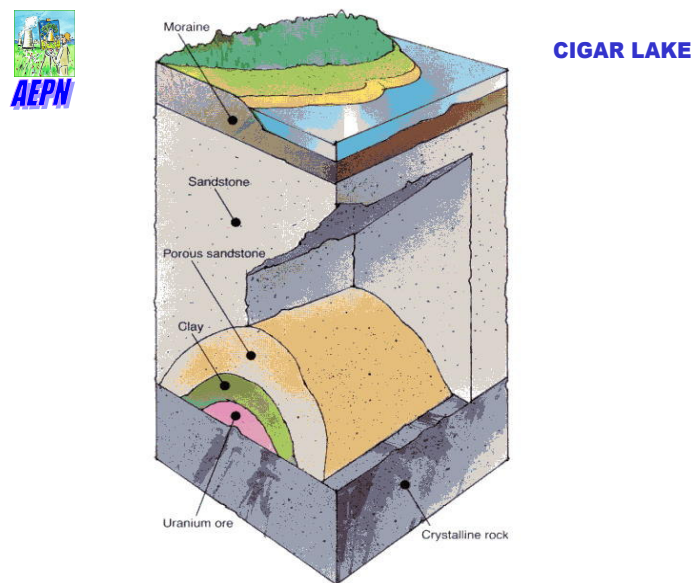
(Courtesy : SKB)

Les **dépôts de sel** ont des propriétés voisines : là où il y a du sel, il n'y a pas d'eau. Mais on peut vouloir valoriser ce sel un jour...

Le **granite** offre un solide stockage en zones primaires très stables, à condition d'avoir une masse compacte sans fissures (circulation possible d'eau).

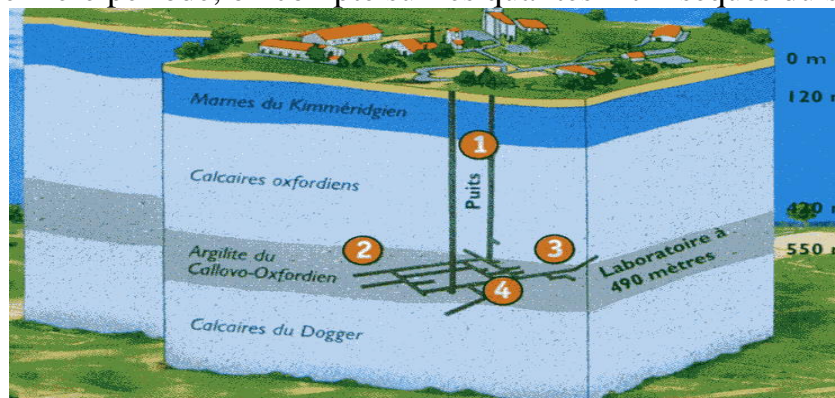
Il existe une très grande variété d'exemples dans la nature qui nous indiquent qu'un stockage convenable remplit son rôle d'isolation au cours des âges. Les réacteurs d'Oklo au Gabon, qui ont fonctionné de manière naturelle il y a deux milliards d'années, pendant quelques millions d'années, et dont les « déchets » ont très peu migré dans un milieu schisteux, sont un bon exemple.

Le lac de Cigar Lake au Canada, qui surplombe la mine d'uranium la plus riche connue, en est protégé par une couche d'argile fortement réductrice (absence d'oxygène) qui évite la lixiviation du minerai radioactif. L'eau du lac situé au-dessus ne présente pas de radioactivité.



(courtesy : SKB)

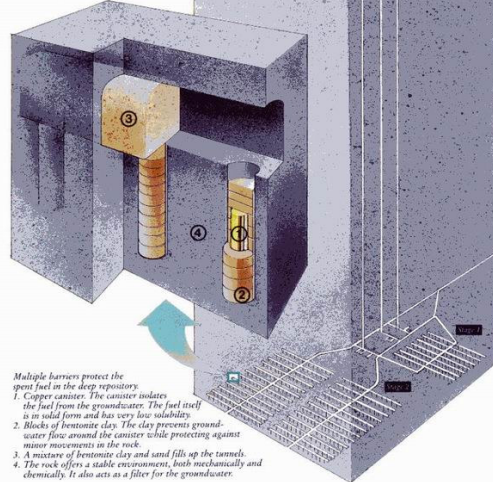
Dans tous les cas, il est prévu que les colis seront au préalable entourés d'une couche fine d'argile imperméable et adsorbante pour capter les fuites de radioéléments possibles si le container primaire venait à se percer ou se corroder, au bout d'un temps estimé à une dizaine de milliers d'années. Au-delà de cette première période, on compte sur les qualités intrinsèques du stockage





Deep repository for spent nuclear fuel (SKB)

Schematic drawing of a deep repository. A system of tunnels with vertical deposition holes is built at a depth of about 500 metres. The spent fuel assemblies are encapsulated in copper canisters. The canisters are placed in the holes, where they are embedded in bentonite clay.



Multiple barriers protect the spent fuel in the deep repository.

- 1. Copper canister. The canister isolates the fuel from the groundwater. The fuel itself is in solid form and has very low solubility.*
- 2. Blocks of bentonite clay. The clay prevents groundwater flow around the canister while protecting against minor movements in the rock.*
- 3. A mixture of bentonite clay and sand fills up the tunnels.*
- 4. The rock offers a stable environment, both mechanically and chemically. It also acts as a filter for the groundwater.*

pour éviter la diffusion : Dans les couches argileuses envisagées, la migration des éléments se compte en dizaines de milliers d'années par mètre de substrat.

Tous les experts sont d'accord sur la solution géologique, avec les précautions d'absence de circulation d'eau indispensables.

Il est faux de dire que l'on n'a pas de solutions : on recherche seulement les solutions optimales pour le substrat considéré.

Les programmes détaillés de simulation PAGIS et EVEREST de la Commission Européenne arrivent également à la conclusion que les populations vivant directement au-dessus de stockages géologiques, même en circonstances défavorables, ne recevront à aucun moment de dose significative (moins d'un millième de la radiation naturelle).

D'ailleurs plusieurs pays ont opté ou se préparent pour ce genre de stockage : La Finlande, la Suède (granite), les USA (sel, schistes), la Belgique (argile).

La logique du stockage souterrain sécurisé des déchets à vie longue s'appuie sur trois périodes de durées inégales :

1. Les produits de fission, qui constituent le gros de la radioactivité « rayonnante » bêta et gamma, perdent la majeure partie de leur activité au bout de 300-400 ans. Restent alors les « actinides », principalement émetteurs alpha, et une dizaine de produits de fission à vie longue, émetteurs lents de rayons bêta mous peu dangereux, que l'on peut négliger en termes de radiotoxicité devant celle des actinides.
2. On considère, au vu des essais et de l'expérience, que l'emballage verre + container en inox soudé, peut résister au moins une dizaine de milliers

d'années dans les conditions du stockage, y compris en cas d'anomalies. (Entrées d'eau limitées).

Durant cette période, la radioactivité des actinides aura sensiblement décru, comme le montre le graphique, pour se rapprocher de la radioactivité de l'uranium du combustible initial, c. à d. un produit dont on peut s'approcher sans danger, mais dont il faut éviter l'ingestion, comme on le ferait d'un minerai arsénié par exemple.

3. Pendant la troisième période, « géologique », on compte sur l'enrobage argileux étanche que l'on a placé autour de l'emballage, et sur les propriétés intrinsèques de la roche-mère, argile, granite ou sel, en comparant avec les enseignements des analogues naturels.



3 PÉRIODES CONSIDÉRÉES :

- **DE 10 A ~400 ANS, : 90 % de
L'ACTIVITÉ A DÉCRU,**
- **JUSQU'À 10 000 ANS : LES
BARRIÈRES OUVRAGÉES,**
- **APRÈS 10 000 ANS : LES BARRIÈRES
GÉOLOGIQUES.**

(QUID DES TOXIQUES INDUSTRIELS ?)

IV. Cas de la France

En 1991, devant une levée de boucliers en France sur le stockage de ces déchets à vie longue, il a été décidé de se donner un délai de 15 ans pendant lequel on étudierait trois voies de recherche possibles, qui sont complémentaires, la solution principale étant celle du stockage géologique en profondeur, la plus évidente et celle qui réunit la plupart des suffrages. Ce stockage géologique sera précédé au préalable par un entreposage des déchets les plus actifs à la Hague pour les laisser refroidir. La Loi Bataille du 30.12.91 fixe les modalités de ces axes de recherche; en 2006, l'an prochain, le Parlement doit préconiser la solution à adopter. On remarquera en passant que l'industrie française peut

facilement s'accommoder de ce moratoire, compte tenu des



QUALITÉS REQUISES POUR LE STOCKAGE

- **SEC (ARGILE, GRANITE, SEL)**
- **IMPERMÉABLE (-"-)**
- **STABLE (SISMICITÉ)**
- **EXEMPT DE FAILLES (PAS D'EAU)**
- **PROFOND (INSENSIBLE AUX VARIATIONS GÉOLOGIQUES)**
- **SANS INTÉRÊT MINIER**
(Cf. CAS DE BURE)

volumes relativement faibles de ces déchets, qui sont entreposés en attendant, dans l'enceinte protégée de l'usine de retraitement de la Hague.

Le stockage en profondeur présente, entre autres avantages, celui de soustraire un produit dangereux aux atteintes humaines.

A. Il fut prévu que l'on étudierait au moins deux sites acceptables pour le stockage géologique, l'un dans l'argile (c'est le cas du site de Bure (Meuse) dans une couche profonde de callovo-oxfordien sur les bords du bassin parisien), l'autre pouvant être, le cas échéant dans un autre milieu. L'Andra ayant reconnu plusieurs sites granitiques susceptibles d'intérêt a fait des démarches pour prolonger ses investigations. L'opposition à un tel site granitique dans les diverses régions envisagées, pour des raisons de polémique antinucléaire, l'a fait abandonner. Nous restons donc avec le site de Bure, dont tout indique qu'il pourrait convenir, mais où l'on a promis à la population, méfiante, que ce site ne serait qu'un « laboratoire d'études » sans stockage..... On a promis qu'il n'y aurait pas de décision de stockage sans enquête publique et vote du Parlement. Ce ne peut être dans les galeries du labo, mais cela pourrait théoriquement être juste à côté.

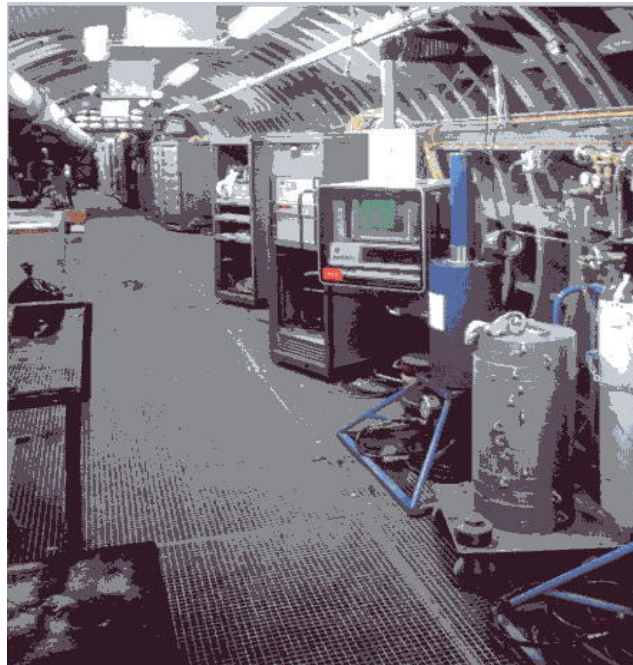
Par ailleurs, il a été admis que tout stockage devrait pouvoir être réversible pendant un certain temps, ce qui complique et renchérit singulièrement les solutions....

A Bure, les « chercheurs » de l'ANDRA ont réussi à convaincre une majorité d'édiles que le stockage, s'il se faisait, serait inoffensif et pourrait constituer un pôle d'activités et d'intérêt pour une région qui en a besoin. Mais la population reste très méfiante et croit qu'on cherche à l'abuser.



FACTEURS de CONFIANCE

- **TRÈS FAIBLES VOLUMES à TRAITER et STOCKER**
- **REPÉRAGE et IDENTIFICATION RIGOUREUX**
- **PLUTONIUM ENLEVÉ**
- **INALTÉRABILITÉ DES VERRES**
- **CONFINEMENT DANS CONTAINERS ÉTANCHES+ARGILE ABSORBANTE**
- **MASSIF GÉOLOGIQUE ADÉQUAT**
- **ANALOGUES NATURELS**



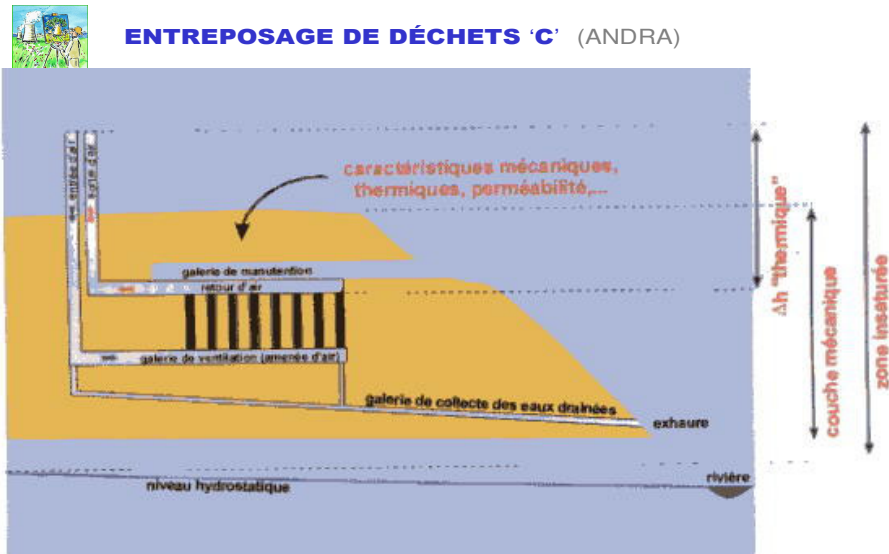
Labo souterrain dans l'argile (Mol, Belgique)

B. La seconde voie de recherche est une solution « provisoire » d'entreposage à faible profondeur, en « subsurface », permettant une mise en sécurité tout en réservant l'avenir. Pourquoi pas ? Ceci oblige néanmoins à prévoir une reprise des colis et nécessite des précautions spéciales pour éviter toutes infiltrations d'humidité.

Nous pensons personnellement, au risque de passer pour iconoclaste, à des entreposages dans les murs épais d'installations nucléaires déclassées : les anciennes usines de Hanford, sur le plateau aride de l'Etat de Washington aux USA, pourraient bien faire l'affaire pour quelques milliers d'années ! De même,

sur le plateau stable de la Hague, un tel entreposage dans les murs épais d'installations déclassées, remaniées en conséquence, pourrait se concevoir.

Au vu de la stabilité dans le temps d'ouvrages comme les Pyramides, sur des sites géologiquement stables et secs, il semblerait également que l'on puisse créer des « tumuli » abritant nos fameux déchets.



C. La troisième voie de recherche est une opération artificielle où l'on isolerait les composés à vie longue par voie chimique pour les « casser » en éléments à vie plus courte dans un flux puissant de neutrons : c'est ce que l'on nomme la transmutation. Cette solution théoriquement attrayante se heurte à une quantité d'inconvénients : l'isolation des produits à vie longue au sein d'une « bouillie » très radioactive, est malaisée et source d'irradiation pour les exploitants ; le rendement ne sera jamais total, il faut donc procéder à de nouvelles séparations, etc. : la machine à transmuter consomme une quantité d'énergie non négligeable...



TRANSMUTATION

ON « CASSE » PAR BOMBARDEMENT NEUTRONIQUE LES ÉLÉMENTS A VIE LONGUE :

- **Soit ACCÉLÉRATEURS/RÉACTEURS SPÉCIAUX, + 'RETRAITEMENT POUSSÉ'**
- **Soit DANS RÉACTEURS RAPIDES : INTÉRÊT DE LA FILIÈRE RAPIDE (Cf. SUPERPHENIX)**

Ce qui est possible en revanche si l'on dispose de réacteurs à flux de neutrons rapides (cf. Superphénix), c'est de pouvoir « brûler » une partie des actinides à vie longue, en transmuter d'autres, et en fin de compte, diminuer la quantité de ces déchets à vie longue, sans avoir à recourir à des expédients compliqués et coûteux. Ceci pour l'avenir. Ces techniques font appel à un retraitement-recyclage dont la fabrication actuelle des combustibles MOX (oxydes mixtes uranium-plutonium) est la préfiguration.

Une solution pour se débarrasser des déchets nucléaires, envisagée dans les années 60 et mise en œuvre de manière trop simpliste, conduisant à son interdiction, est l'immersion en fonds marins. Autant le dépôt sur le fond de la mer semble exclus, autant une immersion dans des couches sédimentaires molles et profondes se refermant sur les colis serait envisageable, à fortiori un dépôt dans une lèvre de subduction tectonique qui ferait disparaître les déchets sous la croûte terrestre. Ces considérations reviendront un jour ou l'autre.



VARIANTES : L'IMMERSION EN MER - STOCKAGE INTERNATIONAL

- **ANNÉES '60 : IMMERSION PROFONDE
DÉCHETS PEU RADIOACTIFS - ABANDON**
- **FAISABILITÉ IMMERSION+INCRUSTATION
DANS ÉPAISSES COUCHES SÉDIMENTAIRES**
- **FAISABILITÉ IMMERSION DANS FAILLES
DE SUBDUCTION EN FOSSES PROFONDES**
- * **STOCKAGES INTERNATIONAUX FUTURS**

V. Quelques pistes de réflexion

Arrivés à ce point, et face à une franche reprise du nucléaire dans le monde dans les prochaines années, la France figurant parmi les pionniers, nous aimerions énoncer quelques remarques parfois à contre-courant des idées reçues.

1. Il s'agit de convaincre les riverains de Bure qu'ils ne risquent rien, mais peuvent au contraire profiter d'une installation-phare de stockage. On peut leur montrer des projets analogues en Belgique, Finlande, Suède....
2. S'ils n'en veulent toujours pas, on peut abandonner Bure provisoirement et se rabattre sur des entreposages ouvragés, comme par ex. sur le plateau de la Hague, déjà protégé.

3. Il paraîtrait mal venu pour la gestion des deniers publics d'aller au-delà des sommes déjà si importantes qu'il a fallu dépenser pour la gestion de ces déchets qui représentent une toute petite fraction de l'iceberg des déchets industriels. Les hautes considérations d'« éthique » doivent d'abord s'appliquer à cette dernière catégorie, celle des parents pauvres, mais combien importante pour la planète et notre avenir de pays industrialisés, tellement en retard sur les techniques appliquées à l'industrie nucléaire.

Ces jours derniers, une collision ferroviaire aux USA a causé la fuite de wagons-citernes de chlore « pourtant aux dernières normes de soudure » : 9 victimes. Toujours aux USA, qui n'ont pas peur de dire les choses, le bromure de méthyle, en principe banni pour sa toxicité, est en demande croissante pour la fumigation des récoltes. Etc. C'est maintenant dans ce secteur qu'il faut réagir.

4. L'ANDRA a fait un excellent travail de traque des déchets et dépôts radioactifs en France. L'ANDRA a fait un travail exemplaire. Il serait peut-être utile de s'en inspirer pour les autres déchets toxiques. Oserait-on dire que l'ANDRA pourrait faire partie d'une Agence des Déchets générale ?

5. On oppose fréquemment les déchets radioactifs aux autres types de déchets, par suite des radiations qu'ils émettent insidieusement sans que l'on s'en aperçoive. On notera que l'on ne détecte pas non plus au premier abord, des déchets contenant du plomb ou de l'arsenic.

Nous pensons qu'il est utile, sans vouloir affoler le public, de le former et lui donner les moyens de pouvoir détecter des niveaux de radiation potentiellement dangereux, en équipant les communautés de compteurs permettant une détection simple, avec des références d'échantillons pour s'étalonner : ceci permettrait en outre de se familiariser avec la radioactivité.

6. Mais avant tout ne nous laissons pas enfermer dans la dialectique antinucléaire qui veut diaboliser un type de déchets particulièrement étudié, confiné, concentré, rendu inoffensif, en regard d'autres déchets qui attendent encore des solutions comparables et dont les quantités sont sans commune mesure avec ces fameux déchets nucléaires.

M.LUNG