

Dossier TPE

Thème : environnement et progrès

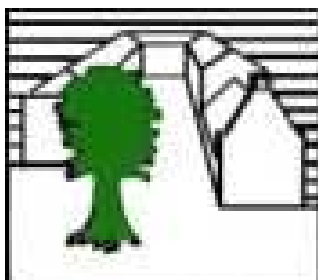
Matières : Sciences physiques et Sciences de la Vie et de la Terre

Sujet : La gestion des déchets radioactifs en France

Problématique : Traitons-nous correctement nos déchets radioactifs ?

Production : <http://tpe-radioactivite-2010.e-monsite.com>

Encadrement : - [REDACTED] (SVT)
- [REDACTED] (Mathématiques)
- [REDACTED] (Physique-Chimie)



Sommaire :

-Introduction.....	3
I. Qu'est-ce qu'un déchet radioactif ? Quels sont les effets biologiques de la radioactivité ?.....	4
A. Définition de déchet radioactif.....	4
1. Les différentes désintégrations.....	4
2. Mesure de la radioactivité.....	5
3. Production de déchets radioactifs.....	6
B. Les effets biologiques de la radioactivité.....	7
1. Les effets stochastiques ou effets probalistes.....	8
2. Les effets déterministes.....	8
II. La gestion des déchets radioactifs en France et les problèmes que cela pose.....	10
A. La transformation.....	10
B. Le transport.....	11
C. Le stockage.....	11
D. Se souvenir.....	13
III. Les projets et les perspectives d'évolution.....	14
A. Dans le cadre de la production de déchets.....	14
B. Dans le cadre du transport.....	14
C. Le stockage en profondeur.....	15
D. L'envoi des déchets dans l'espace.....	15
E. Le stockage en mer.....	16
F. L'accélérateur de particules.....	17
-Conclusion.....	18
-Lexique.....	19
-Bibliographie.....	20

Introduction :

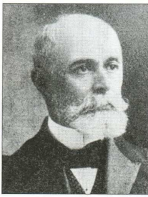
La radioactivité est la propriété de certains corps à émettre des particules ou des rayonnements électromagnétiques de différents types. Elle a été découverte par Henri Becquerel en 1896. Il s'est aperçu que certains produits du laboratoire dans lequel il travaillait émettaient un rayonnement invisible qui ionise l'air et ce sans exposition préalable au soleil. Il s'est également aperçu, à ses dépens, que ces rayonnements pouvaient avoir des effets néfastes sur l'organisme lorsqu'il a découvert un érythème sur sa poitrine, à l'endroit même où il transportait en permanence un tube de matières radioactives dans sa poche. En 1898, Pierre et Marie Curie prouvent que ce phénomène n'est pas uniquement la propriété de l'uranium comme le pensait Becquerel. C'est Marie Curie qui inventa alors le terme de « radioactivité ». Quelques années plus tard, des scientifiques ont découvert que ces rayonnements pouvaient être exploités afin de créer de l'énergie : le nucléaire est né. Seulement cette production engendre également une production de déchets dits « radioactifs », émettant un rayonnement et non réutilisables. Dès lors, il a fallu trouver des moyens de stockage ou de destruction de ces déchets car ils peuvent être très dangereux pour l'homme et leur durée de vie dépasse parfois la dizaine de milliers d'années. Aujourd'hui encore, la gestion des déchets radioactifs pose de réels problèmes et est l'objet de nombreux débats, même dans des pays développés comme la France. Ainsi, les militants écologistes organisent régulièrement des actions « anti-nucléaires ». Un train transportant des déchets radioactifs de la France vers l'Allemagne a d'ailleurs été stoppé plusieurs fois par ce type de mouvements (« Greenpeace »...) en novembre dernier. Ce fut l'occasion pour ces militants de médiatiser leur combat.

Pourquoi la gestion française des déchets radioactifs fait-elle autant débat ? Traitons-nous correctement nos déchets radioactifs ? Pour tenter de répondre à cette question d'actualité, nous verrons tout d'abord ce qu'est exactement un déchet radioactif et quels sont ses effets sur le corps humain, puis comment la France les traite actuellement et les problèmes que cela pose et enfin quelles pourraient être les perspectives d'évolution en matière de traitement des déchets radioactifs.

La radioactivité, de sa découverte à nos jours.

UN PEU D'HISTOIRE

■ **1896** : Henri Becquerel s'aperçoit que des produits de son laboratoire émettent, sans exposition préalable au Soleil, un rayonnement invisible qui impressionne les plaques photographiques et ionise l'air.



Henri Becquerel (1852-1908)

■ **1898** : Pierre et Marie Curie montrent que le phénomène n'est pas uniquement lié à l'uranium. Marie Curie invente le terme de radioactivité.



Pierre (1859-1906) et Marie (1867-1934) Curie quelques jours après leur mariage à Paris en 1895.

■ **1934** : Irène et Frédéric Joliot-Curie découvrent la radioactivité artificielle.



Irène (1897-1956) et Frédéric (1900-1958) Joliot-Curie ont commencé leur travail sur la radioactivité en 1931.

■ **1990** : Une caméra sensible à l'émission radioactive d'éléments injectés dans le corps permet de localiser les zones de fonctionnement du cerveau.

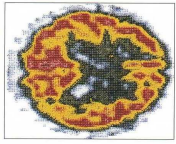


Image du débit sanguin cérébral obtenue par scintigraphie.

■ **1986** : Explosion à la centrale soviétique de Tchernobyl. Un nuage radioactif survole l'Europe.

■ **1999** : Des chercheurs américains ont réussi à produire pour la première fois des noyaux des éléments 116 et 118.

► Compléter la frise historique en recherchant des informations dans une encyclopédie ou sur les sites Internet du musée Curie <http://musee.curie.fr/> et celui du centenaire de la radioactivité <http://www.ccr.jussieu.fr/radio-activite/>

► Préparer quatre questions sur une information concernant le nucléaire. Poser-les ensuite à vos camarades.

1900

1925

1950

1990

I. Qu'est-ce qu'un déchet radioactif ? Quels sont les effets biologiques de la radioactivité ?

A. Définition de déchet radioactif.

Toute activité humaine produit des déchets. L'utilisation des propriétés de la radioactivité dans de nombreux secteurs engendre par conséquent quantité de déchets radioactifs, présentant des risques pour l'homme et l'environnement. Ce sont des substances dont aucun usage n'est prévu et dont le niveau de radioactivité ne permet pas la décharge sans contrôle dans l'environnement. A ce titre, ils doivent être gérés de manière spécifique en fonction de leur niveau de radioactivité et de leur durée de vie.

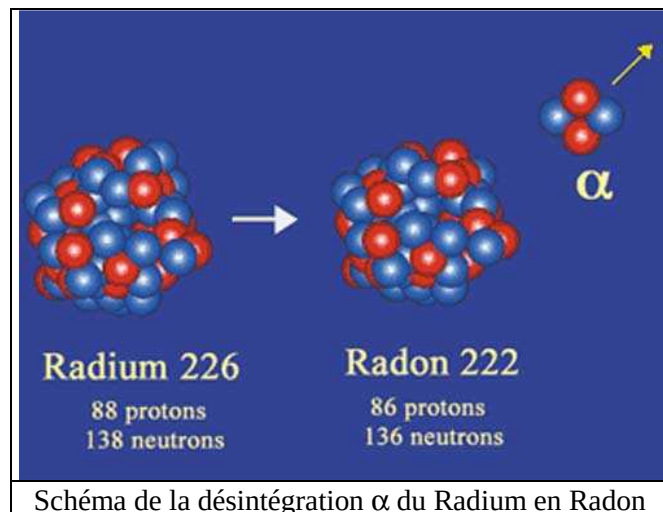
1) Les différentes désintégrations

Le terme « radioactif » signifie que les atomes constituant les déchets sont instables et vont se transformer pour se stabiliser, en émettant un rayonnement. Il existe ainsi quatre types de rayonnements, appelés aussi désintégrations :

-La désintégration alpha α fait perdre à un atome deux protons et deux neutrons (soit un noyau d'hélium). Elle est peu énergétique et une feuille de papier suffit à arrêter ce rayonnement.

Exemples : Désintégration α de l'uranium en thorium: $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} + ^4\text{He}$.

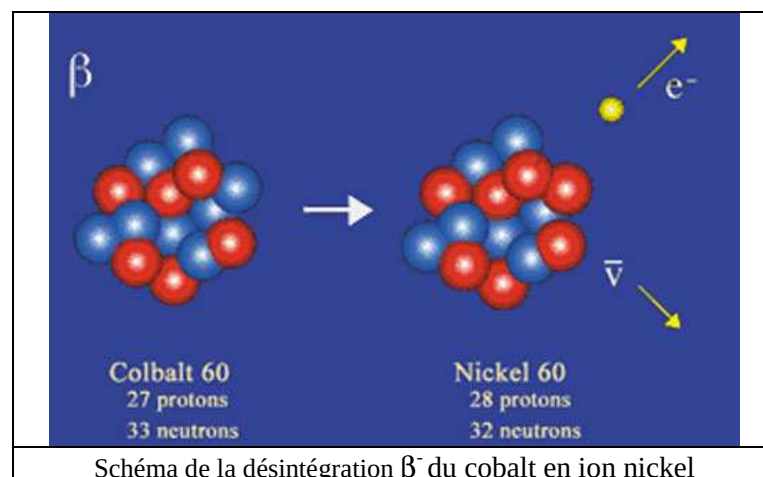
Désintégration α du Radium en Radon : $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn} + ^4\text{He}$



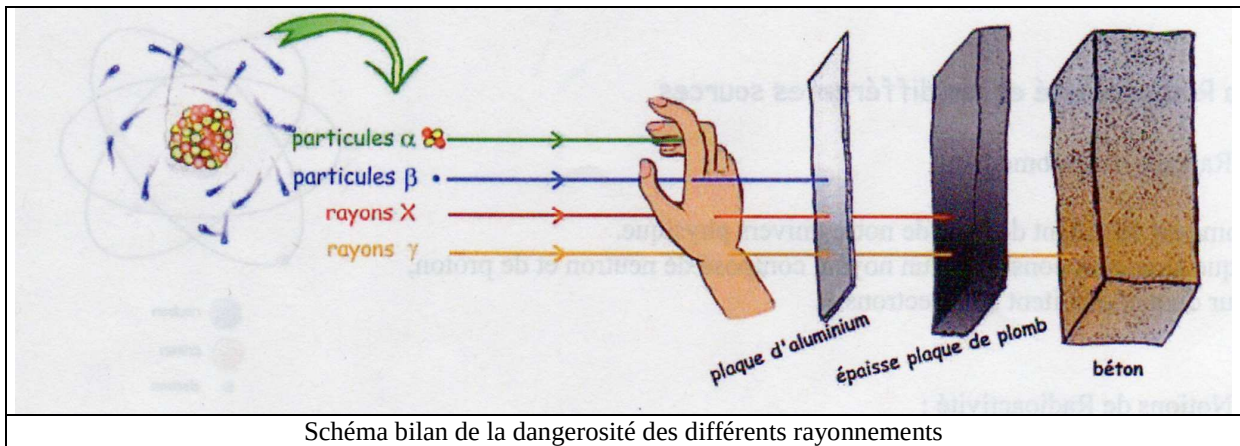
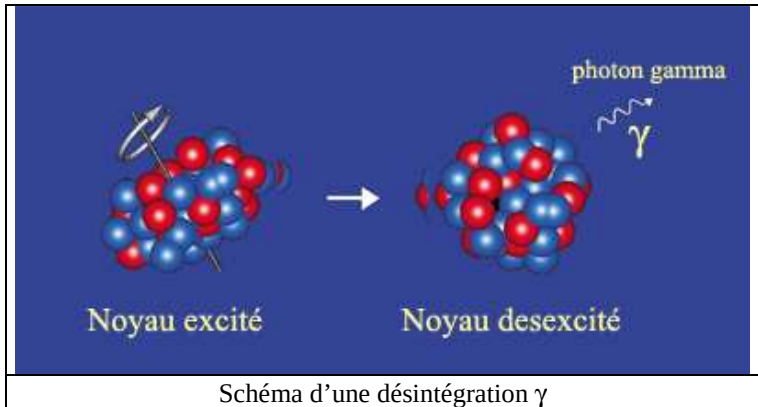
-La désintégration bêta β transforme un nucléon (proton ou neutron) en un autre accompagné d'une particule bêta (électron ou positron). Si un neutron se transforme en un proton et un électron, on parle de désintégration bêta moins, alors que si un proton se transforme en un neutron et un positron, on parle de désintégration bêta plus.

Exemples : Désintégration β^+ du fluor en oxygène : $^{18}\text{F} \rightarrow ^{18}\text{O} + e^+$

Désintégration β^- du cobalt en ion nickel : $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}^+ + e^-$



-La désintégration gamma γ est un rayonnement électromagnétique du à un trop plein d'énergie dans certains atomes après une désintégration α ou β . Ceux-ci s'en débarrassent en émettant des rayons gamma, de même nature que les rayons X. Ils sont beaucoup plus dangereux car plus pénétrant que les autres rayonnements. En effet, ils peuvent parcourir des dizaines, voire des centaines de mètres et il faut plusieurs décimètres de béton pour arrêter ces rayonnements. Ce n'est pas, à proprement parler, une désintégration mais plutôt une émission de photons pour évacuer le trop plein d'énergie accumulé pendant les désintégrations α et β .

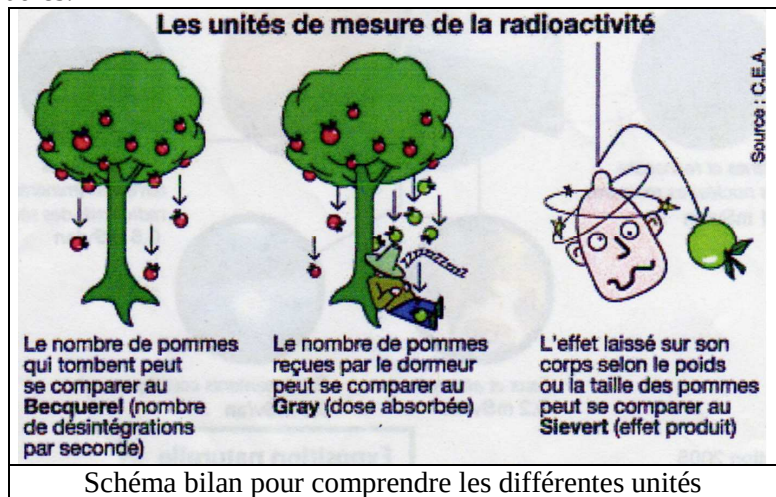


2) Mesure de la radioactivité

La radioactivité se mesure en Becquerel (Bq). 1 Bq correspond à une désintégration d'un noyau radioactif par seconde. Un humain de 70 kg a une radioactivité de 8 000 Bq, alors que les déchets nucléaires tels que le plutonium 239 ont une radioactivité de 2,3 GBq/g.

La quantité ou dose d'énergie absorbée par kilogramme de matière exposée se mesure en Gray (Gy). C'est une unité dérivée du système international qui correspond à un joule par kilogramme. Le type de rayonnement ainsi que la dose absorbée sont donc pris en compte.

L'impact de la radioactivité sur la santé humaine se mesure quant à lui en Sievert (Sv). C'est une unité très proche du Gray car elle se mesure également en joule par kilogramme. Seulement, un autre facteur est déterminant : la radiosensibilité des tissus irradiés.



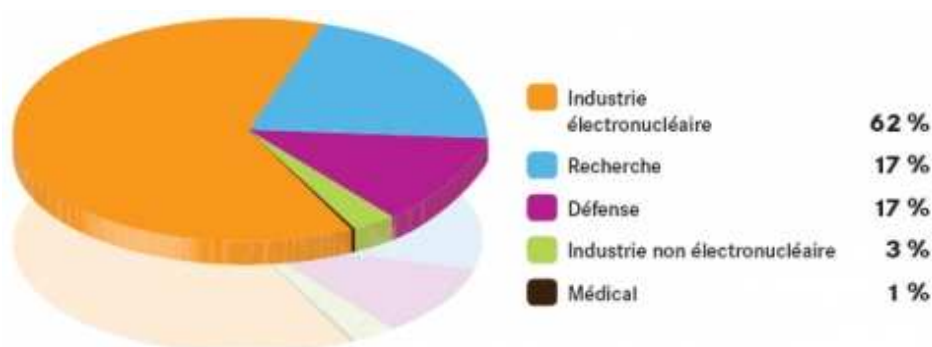
3) Production de déchets radioactifs

Le principal combustible nucléaire est composé d'uranium 238 et d'uranium 235. La teneur trop faible en uranium 235 (0,7 %) dans l'uranium naturel doit être portée à plus de 3 % pour alimenter les réacteurs. A la sortie, on retrouve des produits de fission dus à la combustion de l'Uranium 235 : Deux atomes se repartissent 92 protons et 141.5 neutrons en moyenne (2.5 neutrons sont immédiatement consommés en moyenne).

En France, environ 2 kg de déchets radioactifs sont produits par an et par habitant, alors que les déchets industriels représentent 2.500 kg par an et par habitant et les déchets ménagers 360 kg par an et par habitant. Les déchets nucléaires sont donc présents en plus petites quantités, néanmoins leur caractère dangereux nous oblige à les traiter avec beaucoup de prudence. En France, c'est L'ANDRA, un organisme créé en 1979 au sein du CEA (Comité de l'énergie atomique), qui contrôle la gestion des déchets issus de l'activité nucléaire. Cet organisme a ainsi classé ces déchets en plusieurs catégories définies selon le niveau de radiations et leur période. La période (aussi appelée demi-vie) correspond à la durée nécessaire au déchet pour que son activité radioactive diminue de moitié. La durée de ces demi-vies est extrêmement variable, allant de quelques millisecondes pour le Bohrium 262 à plusieurs milliards d'années pour le Thorium 232. L'ANDRA a donc défini 6 classes de déchets récapitulées dans le tableau ci-dessous :

	Vie très courte (VTC) Période < 100 jours	Vie courte (VC) Période < 31 ans	Vie longue (VL) Période > 31 ans
Très faible activité (TFA)	Déchets VTC	Déchets TFA	
Faible activité (FA)		Déchets FMA-VC	Déchets FA-VL
Moyenne activité (MA)			Déchets MA-VL
Haute activité (HA)		Déchets HA	

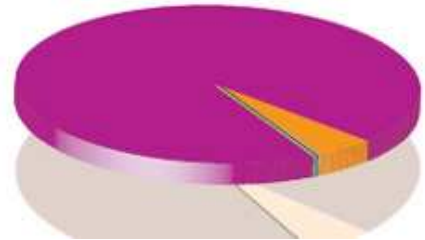
En France, on compte fin 2007 un peu plus de 1100000 m³ de déchets. Ils sont issus pour la plupart de l'industrie électronucléaire (62 %). Vient ensuite la recherche et la défense (17%). L'industrie non électronucléaire représente 3% de la production de déchets nucléaires et enfin le médical ne produit que 1 % du total. Ces proportions sont résumées dans le graphique ci-dessous :



Les déchets sont pour la majorité (en volume) des déchets à vie courte et de faible activité : les déchets à très faible activité et les déchets à vie courte représentent à eux seuls près de 80 % du volume total . A l'inverse, les déchets de haute activité ne représentent que 0.2 % du volume total de déchets (illustration 2). Cependant, la balance s'inverse si on les représente proportionnellement à leur degré de radioactivité : les déchets à haute activité représentent ainsi la quasi-totalité de la radioactivité totale (près de 95 %), comme le montre l'illustration 3.



HA	94,98 %	TFA	0,000 003 %
MA-VL	4,98 %	FA-VL	< 0,009 %
FMA-VC	< 0,03 %		

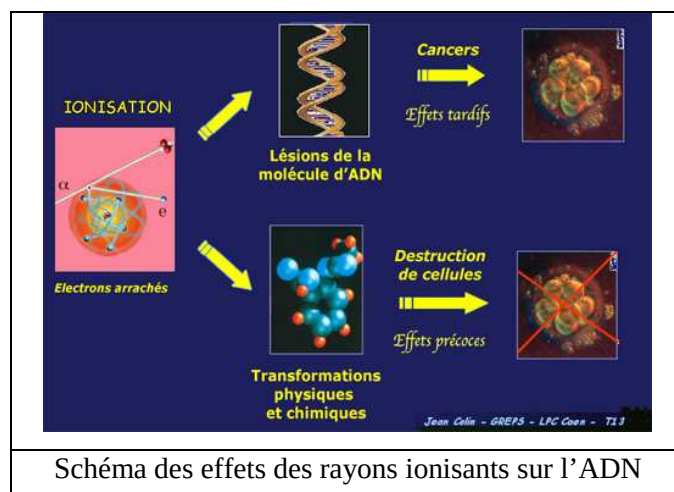


B. Les effets biologiques de la radioactivité.

La radioactivité est utilisée dans beaucoup de domaines, tels que la production d'énergie nucléaire. Le monde scientifique est d'accord pour affirmer qu'elle est dangereuse pour l'homme. Quels sont les effets de la radioactivité sur le corps humain ?

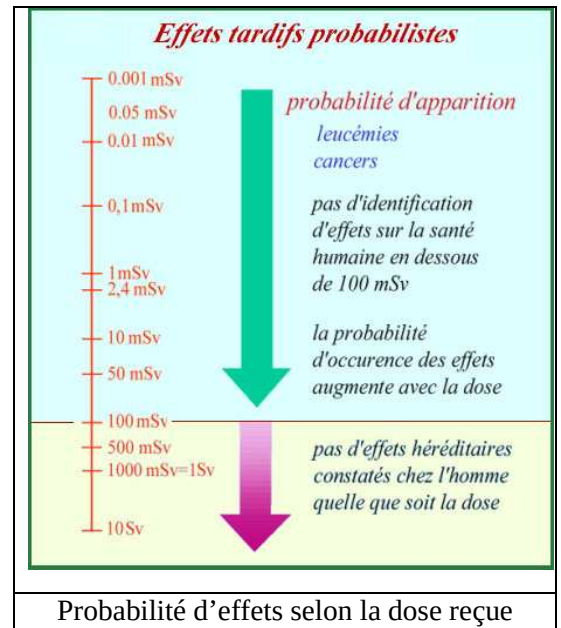
Les effets biologiques de la radioactivité sont exprimés en Sievert (Sv). Cette unité est calculée à partir de la nature du rayonnement, de la dose absorbée par l'organisme ainsi que de la radiosensibilité des différents tissus irradiés. En effet, les rayonnements α , β et γ n'ont pas les mêmes effets sur les tissus et chaque tissu est plus ou moins radiosensible.

Le principal effet biologique de la radioactivité sur un organisme est l'ionisation des tissus vivants. C'est une transformation des atomes présents dans les tissus vivants en ions chargés. Elle advient lorsqu'un rayonnement radioactif traverse les tissus. En effet les rayonnements alpha, bêta et gamma sont très dangereux pour les tissus : lorsqu'ils en traversent un, ils « arrachent » un ou plusieurs électrons à ses atomes les changeant ainsi en ions, ce qui modifie l'activité chimique des cellules. Ces modifications peuvent altérer les membranes ou encore, plus inquiétant, l'ADN (Acide DésoxyriboNucléique), molécule qui porte toute l'information génétique d'un être vivant. Si elle est modifiée, les conséquences peuvent donc être très graves pour l'homme en entraînant par exemple des cancers. Notre organisme est prévu pour remédier à ces changements et bien souvent, il le fait automatiquement. Seulement, certains sont « oubliés » par exemple si le rayonnement a été trop intense et bref et dans ce cas là les effets sont visibles sous peu. Ainsi, Henri Becquerel, qui a découvert la radioactivité en 1896, observa un érythème (brûlure comparable à un coup de soleil) sur sa poitrine alors qu'il transportait en permanence un tube contenant des matières radioactives dans sa poche de veste. Un autre exemple significatif est celui de Marie Curie qui a manipulé des matières radioactives à mains nues pendant ses recherches et qui a fini sa vie avec les paumes brûlées. Les rayonnements radioactifs ionisants peuvent ainsi toucher directement ou indirectement la molécule d'ADN. Cependant les effets sont les mêmes dans les deux cas : les deux brins de l'ADN peuvent être séparés, déformés ou les liaisons entre eux altérées. Toutefois, ces problèmes sont souvent résolus automatiquement par notre organisme qui va réparer la molécule et dans ce cas-là, aucun effet n'est apparent. Si tel n'est pas le cas, les effets vont surtout dépendre de la dose reçue. En cas d'irradiations faibles ou moyennes, il n'y a presque aucun moyen de savoir les effets à l'avance, qui sont surtout dus au hasard. Mais il y a quand même des probabilités qui ont été établies : ce sont les effets probalistes. A l'inverse, si la dose est plus importante, des effets graves peuvent être observés, souvent prévus à l'avance : ce sont les effets déterministes.



1) Les effets probalistes ou effets stochastiques.

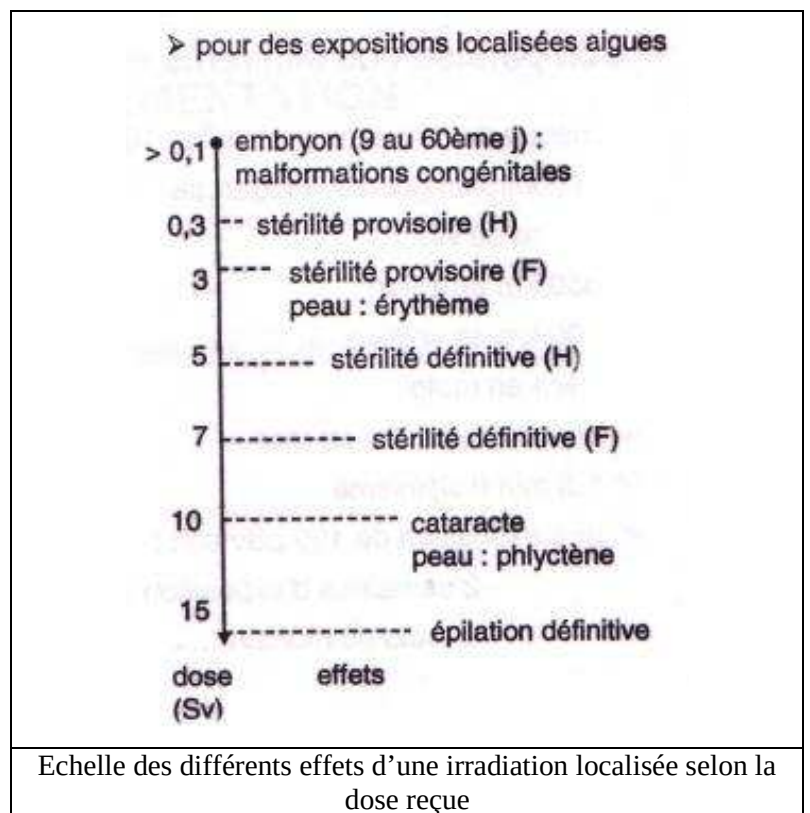
Si l'organisme reçoit des doses faibles ou moyennes, les effets qui vont s'en suivre sont très incertains et aléatoires: on ne peut faire que des conjectures ou des probabilités, d'où leur nom d'effets probalistes. De plus, lorsqu'un tel effet se manifeste, le patient croit souvent qu'il est attribué à autre chose que la radioactivité (tabagisme...) puisqu'il ne survient que très tardivement. Ainsi, personne ne sait si le cancer fatal à l'acteur John Wayne en 1979 est vraiment du à la radioactivité : il est vrai qu'il a tourné un film proche d'un site d'essais nucléaires 25 ans plus tôt, mais il fumait également plus de deux paquets de cigarettes par jour donc le doute persiste. Même aujourd'hui, avec des moyens beaucoup plus modernes que trente ans en arrière, ces effets ne sont quasiment jamais attribués à la radioactivité mais à d'autres causes comme le tabagisme, l'exposition aux ultra-violets... La plupart des effets stochastiques (probalistes) se manifestent sous la forme de cancers.



2) Les effets déterministes

Les effets déterministes n'apparaissent que lors d'une exposition brève et intense, au-delà de 0.35 sieverts. Cependant, ils sont différents si l'irradiation est localisée ou si l'organisme entier est irradié.

-En cas d'irradiation localisée, les effets peuvent être immédiats ou retardés. Les effets immédiats se traduisent souvent par un érythème ou des brûlures telles que celles dont souffraient Henri Becquerel ou Marie Curie. Les effets retardés peuvent quant à eux entraîner une stérilité provisoire ou définitive. Une irradiation de l'œil provoque également la formation d'une cataracte.



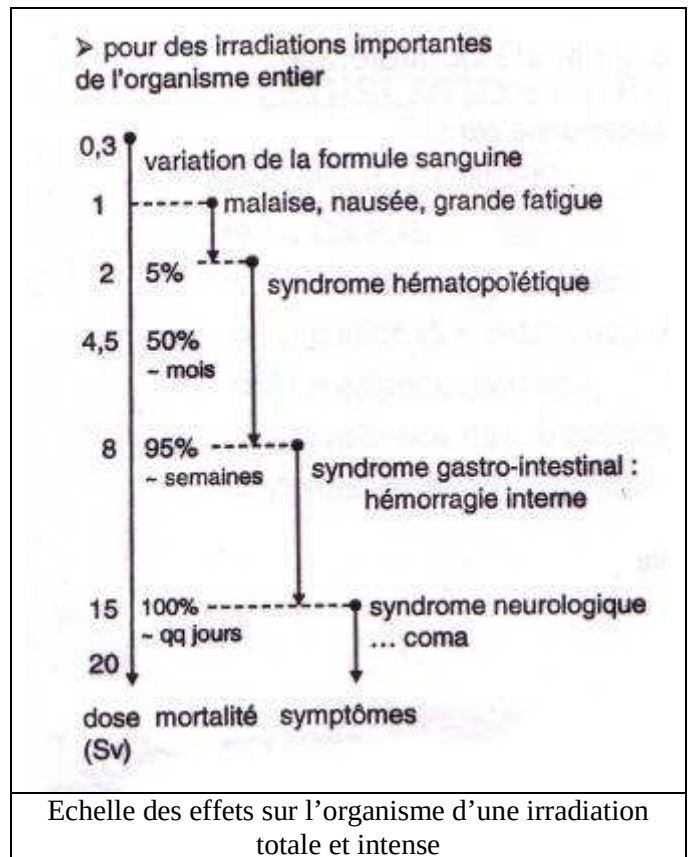
-Lorsqu'un organisme entier est irradié pendant une courte durée mais très intensément, on observe souvent un syndrome d'irradiation aiguë, qui est le plus grave symptôme du à la radioactivité. La mort du patient est souvent inéluctable ou si tel n'est pas le cas des effets très graves sont observables. Par exemple, sur les 238 sauveteurs qui sont intervenu à Tchernobyl, 31 sont mort en quelques jours.

Le syndrome d'irradiation aiguë est divisé en trois phases :

-Phase prodromale : Elle est observée après une irradiation de plus de 1Sv et entraîne la destruction des globules blancs, rouges et des plaquettes présentes dans le sang. Cette phase est caractérisée par des malaises, des vomissements, des nausées, de l'anorexie...

-Phase latente : On observe une régression voire la disparition des symptômes.

-Phase des trois syndromes : Selon la dose reçue et la durée des phases latentes et prodromales, cette troisième phase est elle-même subdivisée en trois syndromes : le syndrome hématopoïétique, le syndrome gastro-intestinal et le syndrome neuro-vasculaire. Ils sont cités ici par ordre croissant de dangerosité. (Nous ne détaillerons pas les caractéristiques précises de ces trois syndromes).



II. La gestion des déchets radioactifs en France et les problèmes que cela pose.

Aujourd'hui, il n'y a pas de réelle « solution miracle » pour traiter les déchets radioactifs produits en France (mais aussi dans les autres pays). Ainsi, le meilleur moyen que les chercheurs aient trouvé est l'enfouissement des déchets ou leur enfermement en surface (dans des bâtiments en béton) afin de les isoler de la population et que leurs rayonnements ne touchent pas les humains. Cependant, les déchets ne sont pas traités de la même manière (même profondeur, même site...) selon leur classe (FA-VC, HA-VL...). C'est pour cette raison qu'il n'y a pas un seul centre stockage en France mais plusieurs, pratiquement un pour chaque classe. Avant le stockage, il y a aussi les étapes de la transformation et du transport.

A. La transformation

Tous les déchets radioactifs ne sont pas stockés. Certains sont encore réutilisables et peuvent-être recyclés. Ainsi, la France est première puissance mondiale en capacité de traitement du combustible usé grâce à son usine de retraitement de la Hague, dont le but est de séparer les différents déchets radioactifs. Ouvert en 1966, elle peut retraiter jusqu'à 1700 tonnes de combustible usé par an alors que la capacité mondiale est de 3000 tonnes. Elle recycle les déchets de la France mais aussi de l'Allemagne, de la Belgique, de la Suisse, des Pays-Bas et du Japon. A la fin du traitement, elle réexpédie les déchets dans leur pays d'origine dans le cadre de la loi Bataille (1991). C'est d'ici qu'est parti le train de déchets radioactifs à destination de l'Allemagne en novembre 2010.

Il y avait également à Codolet (Gard), dans le site nucléaire de Marcoule, une usine de retraitement du combustible usé, désormais fermée. Il reste par contre une section, le CENTRACO (Centre Nucléaire de TRAitement et de COnditionnement des déchets faiblement radioactifs) qui fond les déchets métalliques, incinère les déchets combustibles et compacte les autres à destination des centres de stockage.

Le traitement du combustible usé consiste à séparer les éléments potentiellement réutilisables (L'Uranium et le Plutonium) des déchets ultimes (qui ne peuvent qu'être stockés) à savoir les Actinides mineurs tels l'Américium 241 ou le Curium 244 à vie moyenne ou le Neptunium 237, l'Américium 243 ou le Curium 245 à vie longue. On utilise pour ce faire le procédé PUREX : *Plutonium and Uranium Refining by EXtraction*.

Il existe des étapes préalables à la mise en place du procédé : l'élimination des gaines par cisailage ou dissolution, la dissolution du combustible irradié dans l'acide nitrique et la récupération des solides insolubles qui serviront plus tard. Commence alors le procédé PUREX à proprement parler. On extrait d'abord l'Uranium et le Plutonium par un solvant organique de 30% de tributyle-phosphate dans du dodécane ($C_{12}H_{26}$), puis on récupère les produits de fission de la phase de l'acide nitrique. On extrait ensuite le Plutonium de la solution Uranium/Plutonium (respectivement 95 %/5%) par réduction (transfert d'électron). Enfin on épure, on concentre et on transforme chimiquement l'Uranium et le Plutonium afin qu'ils puissent être réutilisés. Les actinides mineurs et les produits de fission restant sont calcinés, vitrifiés et envoyés dans les sites de stockage. On réutilise le Plutonium et l'Uranium pour produire du MOX (Mélange d'Oxyde d'uranium et de plutonium) utilisé dans les réacteurs électrogènes. L'Uranium restant est ré-enrichi pour resservir dans les réacteurs.

Ces centres de retraitement sont très surveillés grâce à une procédure très stricte, mais une erreur humaine ou une catastrophe (séisme, crash d'avion...) sont envisageables. Les conséquences seraient alors très graves pour l'environnement et les populations.



Usine de La Hague



CENTRACO

B. Le transport :

Une fois apte à être stocké, le déchet radioactif est transporté jusqu'au site de stockage. Ce transport vers les centres de stockage de l'ANDRA est à la charge du producteur. Celui-ci choisit la compagnie de transport ainsi que l'itinéraire du convoi. Au départ et à l'arrivée, les chargements sont examinés (irradiation et contamination). C'est l'ANDRA qui gère le flux des arrivées de convois dans ses centres de stockage pour éviter tout problème de surchargement. Lorsque le camion ou le train quitte le centre de stockage, il est une nouvelle fois examiné pour vérifier qu'il ne présente aucun danger pour le chauffeur ou toutes les personnes qui seront en contact avec lui. Seulement, ces convois sont très controversés par des associations écologiques telles que *Greenpeace* ou *Sortir du nucléaire*. Ainsi, un train de déchets radioactifs partant de l'usine de retraitement de La Hague en direction de l'Allemagne a vu son trajet perturbé par des militants antinucléaire qui dénonçaient son chargement (novembre 2010) : « Ce transport concentre au moins deux fois plus de radioactivité que le total des pollutions radioactives émises par la catastrophe de Tchernobyl » selon le réseau *Sortir du nucléaire*. En effet, on aurait pu craindre un accident ou un attentat terroriste impliquant ce train.

Ce que craignent les riverains des communes qui sont parfois traversées par des convois de matières dangereuses, ce sont les accidents. Selon certaines sources, le train de déchets radioactifs qui a tant fait polémique cet automne serait passé en plein centre de Strasbourg. On ne peut imaginer les conséquences d'un accident ou d'un acte malveillant dans un tel endroit. Si les colis se brisaient, libérant leur contenu dans le lieu de vie même de dizaines de milliers d'habitants, on peut craindre le pire. La même inquiétude est présente en campagne : un tel accident pourrait rendre infertiles voir dangereux des hectares de culture vivrière qui sont la seule source de revenus de certains agriculteurs.

Heureusement, il existe une réglementation très stricte concernant ces convois radioactifs et leur sécurité. Nous l'aborderons dans la troisième partie intitulée *solutions et projets d'avenir*



Un convoi en Russie



Un convoi en Allemagne qui mobilise un nombre impressionnant de policiers

C. Le stockage :

Chaque classe de déchets nécessite une gestion particulière. Ainsi, pour que les personnes en charge d'un centre ne soient spécialisées que dans un type de déchet et donc que la gestion soit meilleure, il existe quasiment un centre de stockage pour chaque classe. On distingue par conséquent plusieurs sites principaux :

- Le centre de stockage de déchets FMA-VC (CSFMA) de l'Aube, à Soulaines. C'est le plus grand centre du monde (95 ha) et il a été mis en service en janvier 1992. 10 millions m³ peuvent y être entreposés et en 2000, 10% de cette capacité était déjà utilisée. A ce rythme, ce centre devrait être en service pour une cinquantaine d'années encore.

- Le centre de stockage de déchets TFA (CSTFA) de l'Aube, à Moirvilliers. Situé à proximité du CSFMA, ce centre a ouvert ses portes en octobre 2003 sur un site de 45 ha, pouvant accueillir 650000 m³ de déchets. Ce site est prévu pour fonctionner une trentaine d'années.

- L'ancien centre de stockage de la manche, à Digulleville, ouvert en 1969 et fermé en 1994. Ce site de stockage de surface est l'ancien CSFMA, remplacé par celui de Soulaines. Avec presque 1,5 millions de colis livrés, ce centre a atteint sa capacité maximale de 530000m³. Depuis de 2003, ce centre est officiellement en surveillance.

Actuellement, deux centres sont en projet pour le stockage des déchets à vie longue, qui sont aujourd'hui provisoirement entreposés à proximité des lieux de production ou des usines de traitement :

- Un centre FA-VL : le site retenu devrait être proposé par l'ANDRA courant 2011 et des études sur ce site ainsi qu'une demande d'autorisation de stockage (auprès des autorités locales) sont prévus en 2013. Ainsi, si l'autorisation est accordée, la construction du centre commencerait en 2015 afin pouvoir y stocker des déchets dès 2019. Ce site est prévu pour un stockage en faible profondeur (15-200m).

-Un centre MA-HA-VL : C'est le gouvernement qui devrait choisir un site en 2013 (parmi les trois ou quatre proposés par l'ANDRA) puis faire une demande d'autorisation de stockage auprès des collectivités territoriales en 2015. Cette même année, une loi devrait être votée sur les conditions de la réversibilité du stockage. En effet, les déchets doivent être accessibles et on doit être capable de les déplacer si jamais un problème survenait. Ainsi, la construction du site est prévue pour 2017 et la mise en service pour 2025. Ce centre est prévu pour un stockage en profondeur ($\approx 500\text{m}$).

-Les déchets à vie très courte ne sont pas stockés à long terme : ils sont gérés sur le lieu de production par décroissance radioactive (≈ 31 jours).

Tableau récapitulatif des caractéristiques des différents centres français.

Filière	Capacité (m^3)	Volume actuellement stocké (m^3)	Flux annuel de déchets stockés (m^3)	Capacité disponible (m^3)
TFA	650.000	100.000 stocké au CSTFA	25.000	550.000 soit une vingtaine d'années au rythme actuel
FMA	530.000	527.225 stockés au CSM (plein depuis 1994)	0	0
FMA-VC	1.000.000	218.000 stockés au CSFMA	Au début ce centre recevait 25 000 m^3 /an. Depuis les progrès réalisés (réduction à la source, traitement, compactage...) ont permis de réduire les flux à 12.000 m^3 /an	782.000 soit une cinquantaine d'années au rythme actuel
FAVL*	De 135.000 à 235.000 (selon le périmètre de déchet qui reste à préciser d'ici 2010 avec les producteurs)	0	0	Ce centre sera rempli en 20 à 30 ans à partir de 2019
MA-HA-VL*	6000 m^3 de déchets HA et 82,000 m^3 de déchets MA	0	0	100 ans d'activité à partir de 2025 dont 40 à 60 de refroidissement des déchets HA avant stockage

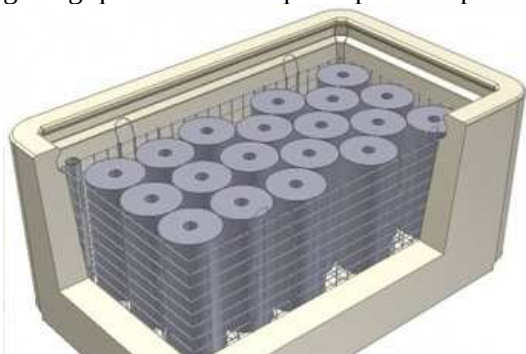
* : centres en projet

Pour empêcher tout contact entre les hommes et les déchets, l'ANDRA utilise le concept « multi-barrière » au moment du stockage. Ainsi, les déchets sont isolés par trois barrières de confinement :

-1 : le colis : Il est composé de 15 % de déchets proprement dits (gants, bottes, outils, etc.... ayant été en contact avec des matières radioactives) et de 85 % d'enrobage (béton, mortier, résine, bitume...) qui immobilise les déchets. L'emballage est soit métallique, soit en béton, selon le volume et la radioactivité des déchets qu'il contient.

-2 : Les ouvrages de stockage : Ils servent à isoler les colis de l'environnement, et surtout de l'eau. Ces « cubes » dans lesquels sont stockés les colis sont en béton et mesurent 25 m de côté pour 8 m de haut. Pendant le remplissage de la case, les colis sont protégés de la pluie par des toits mobiles. Lorsqu'une case est remplie, elle est fermée par une dalle de béton et recouverte d'une couche de polyuréthane imperméable. On vérifie l'étanchéité de ces cases grâce à un réseau de galeries souterraines, régulièrement contrôlées. L'ensemble forme les ouvrages de stockage qui ont été étudiés pour résister aux séismes.

-3 : La barrière naturelle : Ces ouvrages sont construits sur une couche d'argile imperméable qui constituerait une barrière naturelle, en cas de dispersion accidentelle d'éléments radioactifs vers la nappe souterraine. Au-dessus de l'argile, une couche sableuse draine les eaux vers un exutoire unique qui facilite la surveillance de l'environnement et la vérification de l'évolution du stockage (conforme aux prévisions). Enfin, le stockage est situé dans une zone géologiquement stable qui ne présente pas de risque sismique.



Colis dans un conteneur de stockage



Colis métallique contenant plusieurs galettes de déchets MA-VL



Conteneur de stockage MA-VL

Certains déchets radioactifs sont nocifs pendant plusieurs centaines de milliers d'années, ce qui pose de réels problèmes. C'est notamment le cas des déchets à vie longue pour lesquels l'ANDRA a prévu l'ouverture des sites FA-VL et MA-HA-VL. De plus, des associations anti-nucléaires, comme par exemple « sortir du nucléaire » (qui regroupe 873 associations), dénoncent les incertitudes sur la sécurité des sites. Pourtant, l'ANDRA utilise son laboratoire de Bure (Meuse) pour étudier les effets du stockage à long terme des déchets radioactifs en couche géologique profonde. Seulement, il est impossible de prévoir les variations de climat, les changements de position des nappes phréatiques, les tremblements de terre ou encore les intrusions humaines. La seule solution est l'arrêt définitif de la production de déchets radioactifs, mais il faudrait quand même stocker ceux qui ont déjà été produits. Or le stockage tel que l'on trouve aujourd'hui pose problème : les associations écologistes craignent une contamination de l'environnement proche du site, qui pourrait avoir de multiples causes, comme une fuite due à une erreur humaine ou à une catastrophe naturelle. C'est pourquoi l'ANDRA surveille constamment l'environnement pour vérifier qu'il a un impact quasi nul sur le stockage, et ce même sur les sites qui ne sont plus exploités, comme le centre de stockage de la Manche.

Cette surveillance des sites de stockage s'opère en trois phases :

- La première, très active, dure quelques dizaines d'années. Elle permet de suivre l'évolution du stockage, de sa couverture et d'aménager au besoin les installations nécessaires au bon fonctionnement du site.

- La seconde qui dure ensuite de 50 à 100 ans permet de vérifier que le stockage se déroule correctement.

- Enfin, la troisième étape sera passive et débutera lorsque les observations précédentes montreront que le site ne présente aucun danger pour l'environnement et on s'assurera que la mémoire du centre sera bien transmise aux générations futures.

D. Se souvenir

Un autre problème majeur que posent les déchets radioactifs est leur durée de vie. En effet, les déchets à vie longue restent dangereux au moins 31 ans, et plusieurs millions d'années pour certains, comme l'Uranium 235 (710 millions d'années) ou le Thorium 232 (14 milliards d'années !). Les générations futures se souviendront-elles de la dangerosité de la radioactivité et de l'emplacement de ces sites ? Patrick Charton, qui travaille sur ce sujet pour l'ANDRA, s'en inquiète et nous fait part de ceci dans un article paru dans « *Le Monde* » : si le souvenir des sites de stockages se perdait et que les hommes y effectuaient un forage, ils prendraient de fortes doses de radioactivité. De plus, il est extrêmement difficile voire même impossible de connaître l'évolution future de l'Homme : « serons-nous plus ou moins intelligents ? Disposeront-nous de technologies totalement novatrices ? » Certains événements imprévisibles peuvent également entraîner des bouleversements dans l'évolution Humaine, comme une guerre, une révolution ou un cataclysme. « Il y a trois siècles, à la cour de Louis XIV, pensez-vous que l'on pouvaient imaginer la France aujourd'hui ? » Les langues et les symboles peuvent aussi changer. Les Hommes du futur ne parleront certainement pas la même langue et leurs symboles seront peut-être différents : « Il faut que les générations futures comprennent ce que nous avons voulu dire. » Par exemple, nous avons perdu le sens des mégalithes de Carnac, des fresques de Lascaux ou du Cercle de Stonehenge. Certaines explications sont proposées mais ce ne sont que des hypothèses. En sera-t-il de même avec les centres de stockage ?



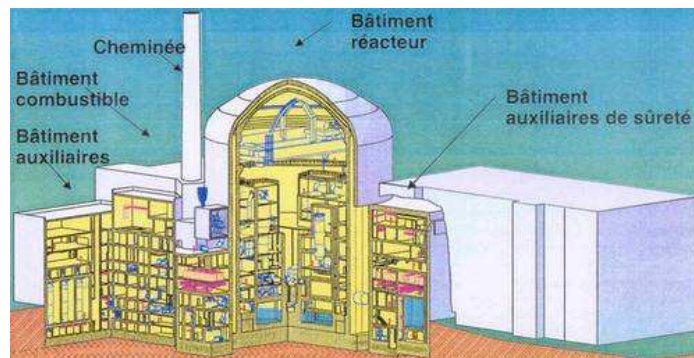
Les mégalithes de Carnac : un message encore inconnu ?

III. Les projets et les perspectives d'évolution

Nous avons donc vu que les déchets radioactifs présentent un certain nombre de problèmes, écologiques pour la plupart. Pour pallier ces problèmes, l'ANDRA et tous les acteurs du nucléaire proposent des alternatives afin de réduire le nombre de déchets, mais aussi de développer des réacteurs plus performants qui ont un meilleur rendement.

A. Dans le cadre de la production de déchets

Le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives) étudie avec 13 pays du monde (l'Argentine, le Brésil, le Canada, la Chine, la Corée du Sud, la Fédération de Russie, la France, le Japon, l'Afrique du Sud, la Suisse, le Royaume-Uni, les États-Unis et l'Union européenne) une nouvelle génération de réacteurs nucléaires : la IV^{ème} génération. Ces réacteurs ont pour principal objectif d'avoir de meilleurs rendements et ainsi de limiter la production de déchets, mais aussi de produire des déchets moins radioactifs, c'est à dire des déchets ayant une demi-vie plus courte et une activité radioactive plus faible. Cependant, ces réacteurs produiraient toujours des déchets ultimes qu'il faudra bien stocker. De plus, ce type de réacteur ne devrait pas voir le jour avant 2040 au moins.



Un projet de réacteur IVème génération

B. Dans le cadre du transport



Un convoi ferroviaire de déchets radioactifs

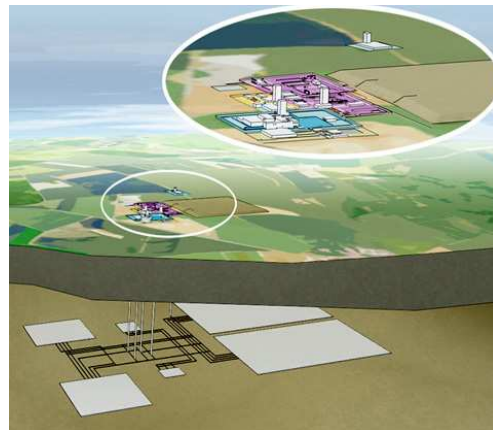
L'ANDRA a adopté une politique stricte par rapport au transport des déchets nucléaires depuis les lieux de production vers les lieux de stockage. En effet, l'ANDRA oblige les transporteurs à suivre une formation spéciale. Chaque conducteur doit présenter une plaque indiquant le type de déchets qu'ils transportent. En cas d'accident (extrêmement rare), le chauffeur possède un dispositif d'arrimage pour empêcher les fuites de déchets radioactifs. D'ailleurs, l'ANDRA affirme que même si un des colis venait à être déversé dans la nature, la faible concentration en radionucléides ne représenterait pas un danger pour la nature. En outre, chaque convoi est escorté de plusieurs effectifs de gendarmerie, et chaque transport est autorisé par l'ANDRA. Ces règles de sécurité semblent fonctionner puisque de 1994 à 1999, sur environ 3000 véhicules ayant assuré le transport routier de déchets à destination du Centre de l'Aube, seulement 3 accidents de la route ont eu lieu et ils n'ont eu aucun impact radiologique.



Un convoi par camion

C. Le stockage en profondeur

Une autre solution envisagée par l'ANDRA est le stockage des déchets à vie longue dans des centres souterrains, à 500 m de profondeur. Ceux-ci sont actuellement à l'étude et ne devraient pas voir le jour avant 2019. En effet, ces types de déchets (qui représentent environ 10 % du nombre total de déchets) sont actuellement stockés sur le lieu où ils sont produits, c'est-à-dire les centrales. Ces centres devront, comme l'exige la loi sur la réversibilité de 2006, permettre aux générations futures de sortir les colis afin de les retraiter si une technologie novatrice le permettait. Cette réversibilité devra être permise sur une durée d'au moins 100 ans. L'ANDRA, suite à une demande de site auprès des communes, a retenu les communes d'Auxon et de Pars-lès-Chavanges dans l'Aube sur lesquelles des investigations plus approfondies ont été menées en 2009 et 2010.



Le projet de centre de stockage HA-MA-VL

D. L'envoi des déchets dans l'espace

L'idée d'envoyer des déchets radioactifs dans l'espace et plus particulièrement dans le soleil a déjà été envisagée. Mais il existe deux problèmes majeurs difficilement réglables :

- Le risque que la fusée explose ou retombe sur Terre au décollage, ce qui aurait pour effet de répandre les substances radioactives sur un rayon assez conséquent.
- Le coût : lancer une fusée Ariane V coûte près de 161 Millions d'€. Celle-ci peut mettre en orbite lointaine une charge utile de 9.6 tonnes. Sachant qu'en France on produit chaque année 10.000.000 de tonnes de déchets radioactifs, il faudrait plus d'un million de lancements de fusées par an soit un coût de 1.7 millions de milliards d'euros chaque année. Il faudrait aussi construire de nouveaux pas de tir et une filière de construction de fusées. Les conséquences écologiques de tant de lancements de fusées seraient également désastreuses à cause de l'utilisation excessive de carburant. Ce serait un paradoxe de polluer la planète en essayant de la rendre plus « verte ».

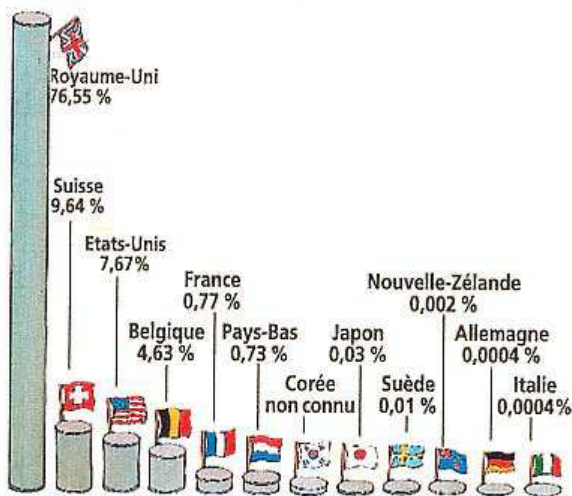
Enfin, envoyer nos déchets dans l'espace pose un problème éthique pour certains : après avoir pollué notre planète, certains sont contre l'idée de contaminer aussi l'espace.



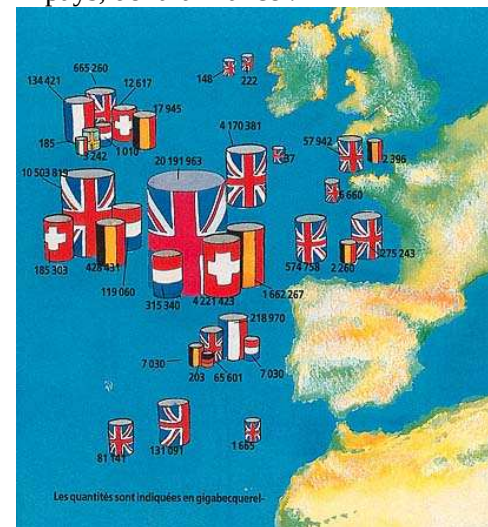
Le lancement d'une fusée Ariane V

E. Le stockage en mer

En 1946, pour tenter de résoudre le problème du stockage de déchets nucléaires, les Etats-Unis ont déversé des fûts radioactifs au large de la Californie. Durant la première phase de développement de l'usage de l'énergie nucléaire, on pensait que la dispersion dans un environnement aussi large que l'océan d'une partie des déchets radioactifs de faible activité pouvait être une solution pour le long terme. Bien que très controversée même par des ingénieurs du nucléaire, cette méthode dura jusqu'en 1982 et plus de 100.000 tonnes de déchets radioactifs placés dans des conteneurs en béton furent déversés au fond de la mer, par 12 pays, dont la France :



Proportion de déchets radioactifs déversés en mer par pays



Quantités de déchets jetés en mer par les pays européens



Des fûts radioactifs jetés à la mer

Ces conteneurs sont censés rester étanche mille ans environ alors que la radioactivité dure plusieurs milliers voire millions d'années. Selon certaines sources, des conteneurs se seraient déjà même fissurés ou ouverts.

Ces déchargements sous-marins furent proscrits par la Convention de Londres, signée en 1975, mais les versements durèrent jusqu'en 1982. Bien que cette solution n'aie jamais été proposée comme stockage viable à long terme, la plupart des déchets radioactifs étant prévus pour être stockés sur Terre, elle a quand même largement contribué à polluer nos mers.

Autre solution parfois évoquée, creuser un puits au fin fond de la mer près des failles géologiques qu'on remplirait de déchets avant de rapidement le reboucher avec des sédiments et du béton. La plaque glisse alors au cours des années et les déchets se retrouvent dans le manteau où ils seraient dilués et mélangés à la radioactivité naturelle. Bien sur, ils pourraient à nouveau resurgir via un volcan, mais cela n'est pas envisageable avant plusieurs milliers d'années. Seulement, il faudrait inventer des foreuses et des conteneurs qui résisteraient à de très fortes pressions ainsi que des sous-marins capables de travailler dans les fonds sous-marins. Là aussi, le coût pourrait dissuader les plus enthousiastes.

F. L'accélérateur de particules

Le CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire) étudie actuellement la possibilité de réduire artificiellement la demi-vie du déchet radioactif avec une sorte d'accélérateur de particules. En effet, certains systèmes dits « hybrides » allient un réacteur nucléaire et un incinérateur de déchets nucléaires. Ce dernier réduit considérablement la demi-vie de la cible en captant des neutrons et donc en transformant le déchet en des noyaux plus stables et donc moins dangereux. Cependant, ce projet n'est qu'une étude et il ne verra pas le jour avant plusieurs années.

Conclusion :

Certains éléments chimiques sont naturellement instables. Ils émettent de l'énergie sous forme de rayonnement (alpha, bêta ou gamma) afin de devenir stable. C'est ce phénomène qu'on appelle radioactivité. Depuis la naissance de l'énergie nucléaire et a fortiori des centrales nucléaires, de plus en plus de déchets radioactifs sont produits, dits « ultimes » (ils ne peuvent plus servir). Seulement, la radioactivité peut être très dangereuse pour l'Homme, selon la manière dont il est exposé. C'est pour cela qu'une réglementation très stricte existe quant à la gestion des déchets radioactifs. Puisqu'aucune technique d'élimination « miracle » n'a encore été mise au point, la tendance est aujourd'hui au stockage sous-terrain des déchets. En effet, des centres de stockage ont été construits ces dernières années et d'autres sont en projet. Les scientifiques travaillant sur ces sites sont protégés non-seulement par des combinaisons mais aussi par le « concept multi-barrières ». Seulement, avant le stockage, quelques déchets peuvent encore être réduits dans l'usine de traitement de la Hague ou au CENTRACO (Uranium et Plutonium), notamment par le procédé PUREX. Le principal problème de la gestion actuelle des déchets est la transmission aux générations futures de la mémoire des sites. En effet, rien ni personne ne peut prévoir les changements de civilisation. Les conséquences seraient désastreuses si un forage était effectué sur un site de stockage. Bien que des projets de meilleure gestion aient été envisagés, aucun n'est actuellement possible, que ce soit par manque de budget ou encore par excès d'optimisme. Au jour d'aujourd'hui, le stockage sous-terrain apparaît donc comme la meilleure technique, malgré tous les problèmes qu'elle engendre.

Lexique :

-**Actinide mineur** : Atome dont le numéro atomique dépasse 92. Ils sont formés dans les centrales par captation d'un neutron et désintégration β . Les plus courants sont l'Américium 241 (32 %) et le neptunium 237 (50 %).

-**ADN** : L'acide désoxyribonucléique est une molécule à deux brins qui renferme le code génétique. C'est donc la molécule la plus importante des êtres vivants. Elle définit également la synthèse des protéines.

-**ANDRA** : Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs. C'est l'organisme chargé de la gestion des déchets nucléaires. Par exemple, c'est à l'ANDRA de chercher des nouveaux sites de stockage de déchets radioactifs.

-**Cancer** : Maladie qui se caractérise par ses effets : certaines cellules « mutent », c'est-à-dire que la molécule d'ADN est altérée. Normalement ces cellules sont éliminées par le corps, mais dans le cas du cancer elles prolifèrent et deviennent des tumeurs qui peuvent engendrer la mort.

-**Cataracte** : Maladie qui opacifie le cristallin de l'œil et peut entraîner une perte de la vue.

-**Classe de déchets radioactifs** :

	Vie très courte (VTC) Période < 100 jours	Vie courte (VC) Période < 31 ans	Vie longue (VL) Période > 31 ans
Très faible activité (TFA)	Déchets VTC	Déchets TFA	
Faible activité (FA)		Déchets FMA-VC	Déchets FA-VL
Moyenne activité (MA)			Déchets MA-VL
Haute activité (HA)		Déchets HA	

-**Désintégration** : Fait pour un atome de se transformer en émettant un rayonnement.

-**Echelle macroscopique** : Echelle dans laquelle l'observation se fait à l'œil nu

-**Erythème** : Lésion dermatologique, dans notre cas, due à la manipulation sans protection suffisante de matières radioactives.

-**Exutoire** : Dispositif servant à juguler un cours d'eau.

-**Industrie électronucléaire** : Ensemble des usines qui utilisent des combustibles radioactifs afin de produire de l'électricité. Il s'agit des centrales nucléaires. Il y en a 19 en France, regroupant 58 réacteurs.

-**Période** : Aussi appelée demi-vie, c'est le temps nécessaire à un élément chimique pour perdre la moitié de son activité radioactive. Elle varie de quelques secondes à quelques milliards d'années.

-**Photon** : Le photon est la particule qui compose les ondes électromagnétiques, des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible.

-**Radionucléide** : Atome dont le noyau est instable et donc radioactif.

Bibliographie :

Livres:

- "Le nucléaire expliqué par les physiciens": édition *EDP sciences* (621.48 NUC)
- "La gestion des déchets radioactifs, questions/réponses" édition *ANDRA* (628.4 CLA)
- "Les laboratoires d'études géologiques" éditions *ANDRA* (628.4 LAB)
- "Physique Terminale S" éditions *NATHAN* 2002

Sites internet :

- www.andra.fr
- www.francenuc.org/fr_chn/trtment_dechets_radioactifs_f.htm
- www.dechets-radioactifs.com
- www.vie-publique.fr/actualite/panorama/texte-vote/loi-programme-du-28-juin-2006-relative-gestion-durable-matieres-dechets-radioactifs.html
- www.asn.fr/index.php/L-ASN-en-region/Division-de-Chalons-en-Champagne/Gestion-des-dechets-nucleaires/Centre-de-stockage-de-l-Aube-CSFMA
- fr.wikipedia.org
- <http://radioactivite4.free.fr>
- <http://www.laradioactivite.com>
- <http://www2.vet-lyon.fr/ens/imagerie/D1/09.Radiobiologie/R-notes.html>

Journaux:

- "Le monde 24/06/2008" p9 (ex009792)
- "Le monde 8/06/2008" p19 (ex009845)

Sources des images utilisées:

- <http://atomicsarchives.chez.com/tchernostousmarin.html>
- <http://vertmongre.wordpress.com/>
- <http://www.techno-science.net/>
- http://www.7sur7.be/static/FOTO/pe/15/15/14/media_xl_3962579.jpg?20101201130451
- http://s1.lemde.fr/image/2010/12/16/600x300/1454572_3_761f_centre-de-stockage-de-dechets-nucleaires-de.jpg
- http://www.futura-sciences.com/uploads/tx_oxcsfutura/img/A5-110307.jpg
- <http://www.andra.fr/>
- <http://www.gralon.net/articles/vignettes/thumb-les-megalithes-de-carnac---un-site-exceptionnel-3909.gif>
- http://www.leparisien.fr/images/2010/11/09/1142660_convoy.jpg
- <http://blog-s.greenpeace.fr/uploads/2010/03/action-110310.jpg>
- <http://www.laradioactivite.com/>
- <http://radioactivite4.free.fr>
- "Physique Terminale S" éditions *NATHAN* 2002