



Dossier du maître d'ouvrage pour le débat public sur le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs

5^{ème} édition du PNGMDR

Quelques repères sur le nucléaire

Ce document est proposé en complément au dossier du maître d'ouvrage. Le lecteur pourra y trouver quelques références sur le nucléaire.



Sommaire

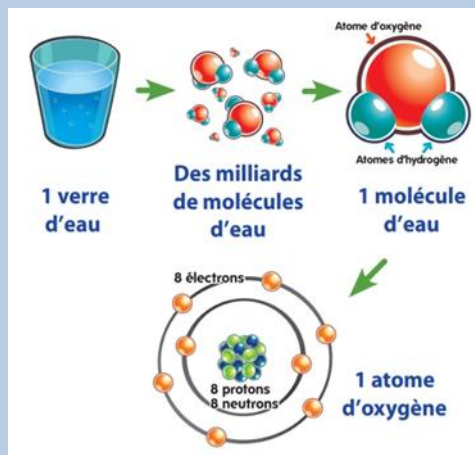
1.	QU'EST-CE QUE LA RADIOACTIVITÉ ?	4
1.1.	L'ACTIVITÉ RADIOACTIVE	7
1.2.	EXPOSITION À LA RADIOACTIVITÉ - ÉNERGIE ET NATURE DU RAYONNEMENT - IRRADIATION ET CONTAMINATION	7
1.3.	MESURER LA RADIOACTIVITÉ – LE CONCEPT DE DOSE.....	8
1.4.	LA RADIOACTIVITÉ AUTOUR DE NOUS - EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS – ORDRES DE GRANDEUR DES DOSES REÇUES	9
1.5.	LES EFFETS SANITAIRES DE LA RADIOACTIVITÉ	12
1.6.	LIMITES D'EXPOSITION	14
1.7.	PROTECTION CONTRE LES EFFETS DE LA RADIOACTIVITÉ : SÛRETÉ, RADIOPROTECTION, CONCEPT DE DÉFENSE EN PROFONDEUR ..	15
2.	LA GESTION DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE.....	16
2.1.	QU'EST-CE QUE LA GESTION DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE ?	16
2.1.1.	Gestion du combustible sans retraitement.....	16
2.1.2.	Gestion du combustible avec retraitement.....	17
2.2.	LA FRANCE A CHOISI DE RECYCLER SES COMBUSTIBLES USÉS	19
2.3.	L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE EN FRANCE	20
2.4.	L'AVANT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE EN FRANCE.....	20
2.5.	LES ENJEUX ÉCONOMIQUES DES DIFFÉRENTES OPTIONS DE RECYCLAGE DES COMBUSTIBLES USÉS D'EDF	21

1. Qu'est-ce que la radioactivité ?

L'atome

Tout élément de notre Univers, du Soleil à notre corps, qu'il soit solide, liquide ou gazeux, est composé d'atomes, d'une taille de l'ordre du dixième de milliardième de millimètre.

L'atome est lui-même composé d'un noyau, autour duquel gravitent des particules électrisées, les électrons. Le noyau est formé de deux types de particules : les neutrons et les protons. Le nombre d'électrons détermine les propriétés chimiques de l'atome. Les noyaux possédant le même nombre de protons, appelé numéro atomique, mais des nombres de neutrons différents constituent ce qu'on appelle des isotopes d'un élément chimique.



La somme du nombre de protons et du nombre de neutrons définit le « nombre de masse », qui sert à désigner les isotopes d'un même élément chimique. Certains de ces isotopes sont stables, d'autres sont radioactifs.

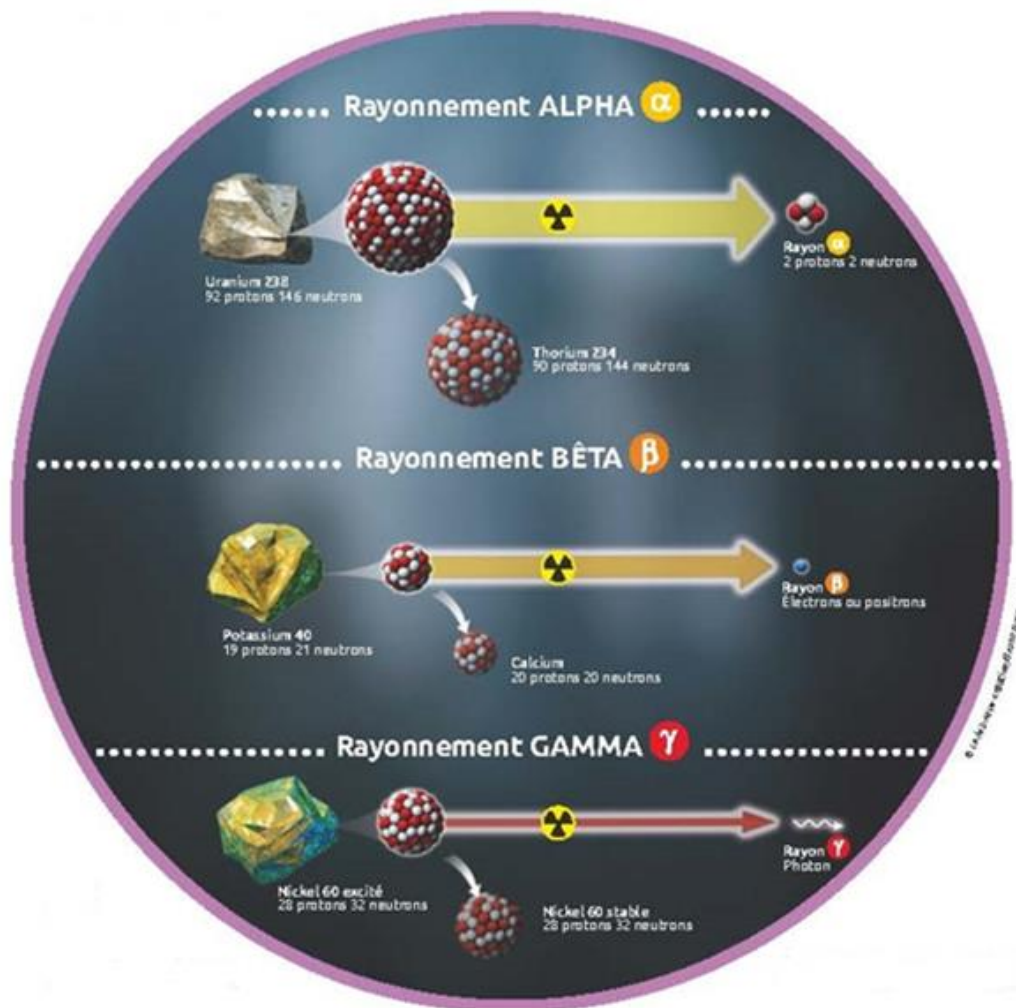
Par exemple, le carbone est caractérisé par un nombre de protons égal à 6. L'isotope carbone 12, qui compte 6 neutrons, est stable. En revanche, l'isotope carbone 14, qui compte 8 neutrons, est radioactif.

La radioactivité désigne la propriété que possèdent certains atomes de libérer, de manière spontanée, de l'énergie en émettant des particules ou des rayonnements électromagnétiques. Lors de cette libération d'énergie, les atomes peuvent changer de nature. On dit qu'ils se désintègrent. Les nouveaux atomes produits peuvent être stables ou être eux-mêmes radioactifs et engendrer à leur tour, par de nouvelles désintégrations radioactives, d'autres atomes.

Les désintégrations des atomes radioactifs conduisent à trois types de radioactivité :

- **la radioactivité alpha** : certains atomes lourds se transforment en émettant une particule massive, formée de deux protons et deux neutrons (noyau d'hélium), que l'on appelle particule alpha ;
- **la radioactivité bêta** : dans le noyau d'un atome radioactif, un neutron peut se changer en proton ou inversement, un proton peut se changer en neutron. Cette transformation s'accompagne de l'émission d'une particule électrisée (électron ou positon), appelée particule bêta ;
- **la radioactivité gamma** : certains atomes radioactifs émettent un rayonnement électromagnétique de haute énergie, appelé rayonnement gamma. Ce rayonnement accompagne généralement d'autres désintégrations radioactives - alpha ou bêta. Les rayons gamma ne sont pas composés de particules matérielles mais de « grains » de lumière, les photons.

Les dangers liés à ces différents types de radioactivité sont présentés au paragraphe 1.3.



La fission nucléaire et ses applications

Certains atomes « lourds », c'est-à-dire possédant un numéro atomique élevé, ont la propriété de se diviser (ils sont dits « fissiles ») en atomes plus légers sous l'effet d'un choc avec un neutron. Les atomes « débris » de l'atome originel sont instables et subissent ensuite une succession de désintégrations radioactives.

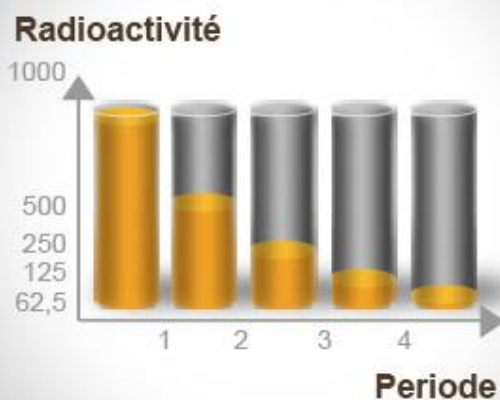
Ce phénomène, appelé fission nucléaire, produit une grande quantité d'énergie. Il s'accompagne de la libération d'autres neutrons, qui peuvent à leur tour provoquer de nouvelles fissions. Une réaction en chaîne peut ainsi se produire.

Dans le cas d'une arme nucléaire, l'emballement de la réaction en chaîne est recherché. Dans un réacteur nucléaire, des barres de contrôles absorbant les neutrons permettent de contrôler la réaction. La chaleur produite par l'énergie que libèrent les réactions de fission est convertie en électricité.

La fission nucléaire constitue la source d'énergie sur laquelle repose le fonctionnement de l'ensemble du parc français de réacteurs électronucléaires de technologie dite à eau sous pression, l'eau constituant le fluide caloporteur. Les noyaux fissiles qu'utilisent les réacteurs du parc français sont soit d'origine naturelle (l'uranium 235), soit obtenus par transformation d'autres noyaux, dits « fertiles », après capture d'un neutron (par exemple le plutonium 239, qui est produit après capture d'un neutron par l'uranium 238 puis décroissances radioactives).

1.1. La période radioactive

Les désintégrations radioactives sont plus ou moins rapides : la période (ou demi-vie) d'un élément radioactif est le temps nécessaire pour que la moitié d'une quantité donnée des atomes qui le composent se soit désintégrée. Cette durée ne dépend pas de l'environnement (température, pression, etc.), c'est une propriété intrinsèque de l'élément radioactif (ou radionucléide) considéré.



Source : Andra

Par exemple, la période radioactive du tritium est de 12,3 ans. Sur un échantillon de 3 grammes de tritium, il n'en restera que 1,5 gramme au bout de cette période.

Cette durée peut varier considérablement d'un radionucléide à l'autre, comme le montrent les quelques exemples qui suivent :

Radionucléide	Période radioactive
Technétium 99m	6 heures
Iode 131	8 jours
Polonium 210	138 jours
Tritium (Hydrogène 3)	12,3 ans
Césium 137	30,2 ans
Radium 226	1600 ans
Plutonium 239	24,1 mille ans

Potassium 40	1,25 milliard d'années
Uranium 238	4,5 milliards d'années

À titre d'illustration, le technétium ^{99m}Tc , dont le rayonnement est utilisé en médecine nucléaire pour faire des scintigraphies osseuses, possède une demi-vie très courte. Après son injection dans le corps d'un patient pour l'examen, il disparaît donc rapidement. A l'inverse, la période radioactive de l'uranium 238 équivaut à l'âge de la terre.

1.2. L'activité radioactive

L'activité radioactive mesure le nombre de désintégrations radioactives qui se produisent dans un échantillon pendant 1 seconde. Elle est exprimée en **Becquerel** : 1 becquerel correspond à une désintégration radioactive par seconde. Anciennement, l'unité de mesure utilisée était le curie (Ci). Un curie (1 Ci) équivaut à $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq, et représente l'activité radioactive contenue approximativement dans 1 gramme de radium 226.

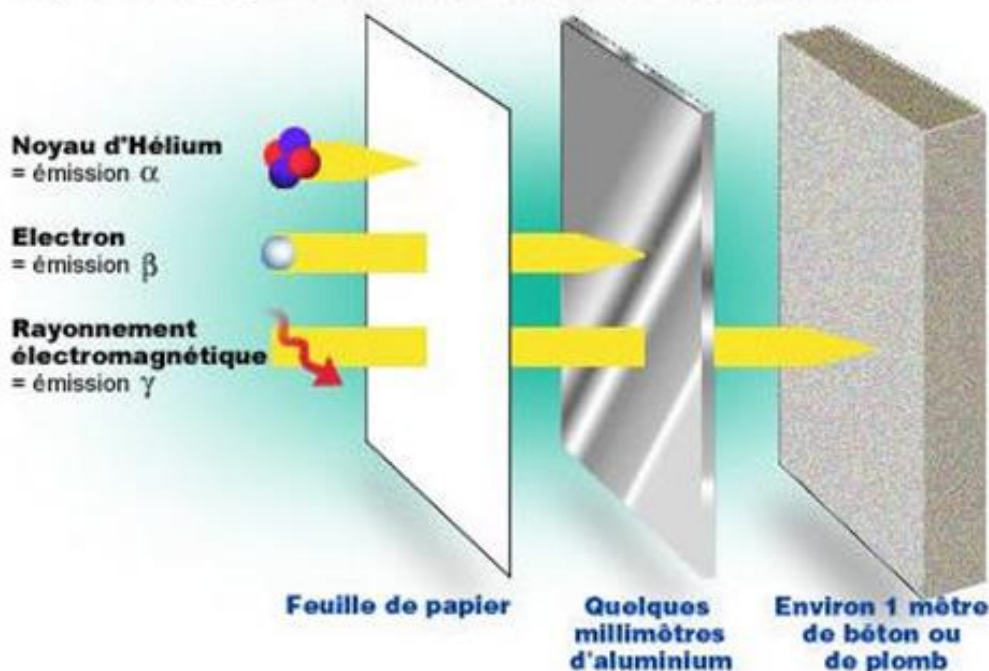
1.3. Exposition à la radioactivité - énergie et nature du rayonnement - irradiation et contamination

Les rayonnements provoquent des effets différents sur la matière en fonction du type de rayonnement et de leur énergie :

- **Les particules alpha** sont peu pénétrantes et arrêtées par une simple feuille de papier. En revanche, elles libèrent une énergie importante lors de leurs impacts.
- **Les particules bêta** sont plus pénétrantes que les particules alpha, elles transfèrent leur énergie à la matière traversée plus progressivement au fil de leur parcours.
- **Les rayonnements gamma** sont très pénétrants, il faut plusieurs centimètres de plomb ou des dizaines de centimètres de béton pour que leur atténuation soit efficace.

¹ Le « m » qui figure après le nombre de masse désigne le caractère « métastable » de l'isotope : ce dernier présente en effet un niveau d'énergie dit « excité ». Le passage de cet état d'énergie « excité » de l'isotope ^{99m}Tc à un état d'énergie plus faible (celui de l'isotope ^{99}Tc du technétium) s'accompagne de l'émission d'un rayonnement gamma.

Le pouvoir de pénétration des différents rayonnements



Le mode d'exposition d'un être humain à la radioactivité est déterminant pour les impacts que cette dernière peut avoir sur l'organisme.

- On parle d'**irradiation** lorsque la source radioactive est située à l'extérieur du corps. Les rayonnements traversent alors l'organisme ou une partie de celui-ci. Avec ce mode d'exposition, le rayonnement alpha ne pénètre pas plus profondément que les premières cellules de la couche supérieure de la peau, alors que les rayonnements bêta et gamma peuvent pénétrer au-delà.

On parle de **contamination interne** lorsque des éléments radioactifs pénètrent à l'intérieur du corps par inhalation, ingestion ou encore si une plaie cutanée est en contact avec des objets contaminés. Selon leur nature, les éléments radioactifs se fixent préférentiellement sur certains organes (par exemple, l'iode se fixera de manière préférentielle sur la thyroïde, le césium sur les muscles...), et le temps de transit dans l'organisme est plus ou moins long.

1.4. Mesurer la radioactivité - le concept de dose

Outre le Becquerel, deux autres unités sont fréquemment utilisées dans le domaine du nucléaire : le **Gray** (Gy) et le **Sievert** (Sv). Le Gray et le Sievert mesurent respectivement l'énergie cédée par les rayonnements et leurs effets délétères sur la matière vivante. Différents types de grandeurs appelés « doses » permettent de quantifier cette énergie et ces effets. De manière plus précise :

- Le **Gray** mesure la dose physiquement « absorbée » par la matière. Elle représente l'énergie absorbée par un kilogramme exposé à un rayonnement ionisant apportant une énergie d'1 joule : $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.
- Le **Sievert** est l'unité de mesure des doses dites « équivalentes » et « efficaces », qui permet d'évaluer l'impact du rayonnement sur la matière vivante :

La dose « équivalente » est le produit de la dose absorbée par un facteur traduisant la nature du rayonnement émis. Cette grandeur vise à permettre de comparer les effets biologiques des différents rayonnements sur un organe isolé. Par exemple, à énergie équivalente, l'effet d'un rayonnement alpha est vingt fois supérieur à l'effet d'un rayonnement gamma.

La dose « efficace » est la grandeur utilisée en radioprotection pour mesurer l'impact global sur l'organisme entier. Elle résulte de la somme des doses équivalentes absorbées par chacun des organes affectés, pondérées par un facteur prenant en compte la sensibilité aux rayonnements propre à chaque organe. Par exemple, le poumon est environ deux fois plus sensible que le foie. Les différentes unités et les notions d'activité et dose sont illustrées par le dessin suivant :

Le débit de dose mesure la dose (qu'elle soit absorbée, équivalente ou efficace) reçue par unité de temps.

Illustration des concepts :



L'activité (Bq) est symbolisée par le nombre de pommes qui tombent de l'arbre par seconde.

La dose absorbée (Gy) est symbolisée par le nombre de pommes qui atteignent vraiment le dormeur.

La dose efficace (Sv) reçue est le nombre de bosses causées par la chute des pommes.

Le débit de dose absorbée (Gy/h ou Sv/h) peut désigner selon le contexte le nombre de pommes qui ont atteint le dormeur pendant une heure, ou le nombre de bosses causées par la chute des pommes pendant une heure.

La relation entre l'activité radioactive d'une substance avec laquelle les travailleurs, les patients ou le public sont en contact (exprimée en Bq) et l'exposition qui en résulte (exprimée en mSv) dépend de plusieurs paramètres : nature des radionucléides présents dans la substance, mode d'exposition à la substance (exposition externe, exposition interne par inhalation ou par ingestion), durée de l'exposition et protection éventuelle entre la source de radioactivité et la cible.

1.5. La radioactivité autour de nous - exposition aux rayonnements - ordres de grandeur des doses reçues

La radioactivité est présente dans les sols et dans l'air que nous respirons. Elle est également présente naturellement à des degrés divers dans l'alimentation (par exemple, 1 kg de pommes de terre contient environ 130 Bq de potassium 40 ; une banane de 150 g contient une activité de 20 Bq).

Elle peut être :

- 
- **d'origine naturelle** : de nombreux éléments radioactifs comme le potassium 40, l'uranium 235 et l'uranium 238, le radium 226 et le thorium 232 sont présents dans l'écorce terrestre. Leur concentration, toujours très faible, varie selon la nature du sol. La radioactivité est cinq à vingt fois plus élevée dans les massifs granitiques que dans les autres terrains. Le radon est un gaz radioactif issu de la chaîne de décroissance radioactive de l'uranium, qui peut s'accumuler dans l'air dans les endroits clos (la moyenne de la concentration en radon dans l'habitat en France est de l'ordre de 70 Bq/m³, mais elle peut varier dans un intervalle très large, y compris entre des zones proches géographiquement, en fonction de la structure des sous-sols et de l'architecture des habitations : de 10 à plus de 10 000 Bq/m³) ;
 - **d'origine artificielle** : rejets liquides et gazeux des installations nucléaires et de certaines activités médicales, dépôts des rejets d'accidents nucléaires, retombées des essais nucléaires dans l'atmosphère.

Le réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM) centralise la surveillance de la radioactivité dans l'environnement en France. Les mesures proviennent des services de l'Etat et de ses établissements publics, des exploitants d'installations nucléaires ou d'autres acteurs publics, privés ou associatifs. Le site www.mesure-radioactivite.fr rend accessibles au grand public les 300 000 mesures réalisées annuellement en France (qui totalisent en 2016 près de 2 millions de données) dans les différents milieux (l'air, l'eau, le sol, la faune et la flore).

La population française dans son ensemble est exposée en permanence à des rayonnements ionisants, c'est-à-dire des rayonnements d'énergie suffisante pour transformer les atomes qu'ils traversent en ions (atomes ayant perdu ou gagné un ou plusieurs électrons), ce qui peut rendre la matière instable. Les rayonnements ionisants peuvent être émis par des atomes radioactifs (que ces derniers soient d'origine naturelle ou artificielle) présents dans l'air que nous respirons ou l'alimentation que nous ingérons, ou par les atomes radioactifs présents dans la croûte terrestre. Ils peuvent également provenir de l'irradiation cosmique (photons et particules venant de l'espace).

L'utilisation des rayonnements dans le domaine médical, à des fins diagnostiques et thérapeutiques, contribue également à l'exposition de la population.

Les différents modes d'exposition de la population se répartissent selon le dessin suivant, en termes de dose efficace moyenne reçue par la population française :

EXPOSITION ARTIFICIELLE

35 %
Expositions médicales



< 1 %
Industries et recherches, essais nucléaires militaires...



TOTAL
exposition
moyenne
des français
4,5 mSv/an

12 %
Eaux et aliments



EXPOSITION NATURELLE

32 %
RADON
Gaz radioactif émanant du sous-sol



14 %
Rayonnements terrestres (minéraux radioactifs des sols) hors radon



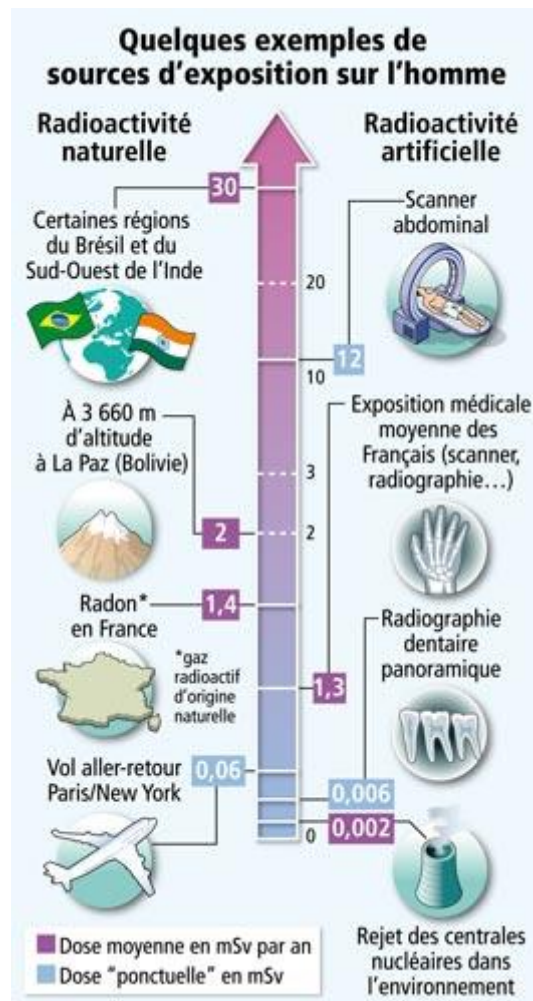
7 %
Rayonnements cosmiques



Exposition de la population française aux rayonnements

Sources : rapport IRSN n°2015-00001, image extraite de l'exposition ASN-IRSN, séquence « La radioactivité c'est quoi ? »

Les contributions majoritaires proviennent des expositions médicales et de l'exposition au radon. La combinaison des différents modes d'exposition, en fonction des lieux d'habitation, des habitudes de vie et de consommation alimentaire et des examens médicaux réalisés, peut conduire à des situations individuelles d'exposition annuelle très différentes.



Quelques exemples de sources d'exposition sur l'homme

Source : site internet IRSN

1.6. Les effets sanitaires de la radioactivité

Les rayonnements ionisants produits par les désintégrations radioactives, qu'ils soient de nature particulaire (radioactivité alpha et bêta) ou électromagnétique (radioactivité gamma), présentent des risques pour la santé. En effet, ils interagissent avec les molécules constitutives des cellules de la matière vivante et les transforment chimiquement. Il existe deux types d'effets biologiques :

- **Des effets immédiats:** une forte irradiation par des rayonnements ionisants provoque des effets immédiats sur les organismes vivants comme, par exemple, des brûlures plus ou moins importantes. En fonction de la dose et selon l'organe touché, le délai d'apparition des symptômes varie de quelques heures (nausées, radiodermites) à plusieurs mois. Des effets secondaires peuvent même être observés des années après une irradiation (fibrose, cataracte) ;

Quand les tissus ne sont pas trop atteints, ces effets sont réversibles et les zones touchées peuvent guérir. Mais, dans le cas d'une très forte irradiation, un trop grand nombre de cellules sont détruites, entraînant la destruction des tissus ou organes irradiés, ce qui peut nécessiter l'amputation d'un membre ou, en cas d'irradiation globale de l'organisme, peut conduire au décès de la victime.

- **Des effets à long terme:** les expositions à des doses plus ou moins élevées de rayonnements ionisants peuvent avoir des effets à long terme sous la forme de cancers et de leucémies. La probabilité d'apparition de la maladie augmente avec la dose. Le délai d'apparition après l'exposition est de plusieurs années à plusieurs dizaines d'années. Une pathologie radio-induite n'a pas de signature génétique particulière : il n'existe pas de marqueur biologique permettant de différencier, par exemple, un cancer pulmonaire dû au tabac d'un cancer pulmonaire radio-induit.

En l'absence d'effets directement mesurables, les risques liés aux faibles niveaux d'exposition sont estimés en extrapolant les données issues de l'étude des survivants irradiés lors des explosions d'Hiroshima et de Nagasaki, ou des patients en radiothérapie, pour lesquels les paramètres d'exposition (dose, débit de dose...) sont très différents.

Même s'il existe une relation entre l'exposition aux rayonnements ionisants et l'apparition de cancers, cette relation n'a pas été démontrée pour de très faibles doses. À l'heure actuelle, les effets sur la santé humaine d'une exposition à des doses inférieures à 100 mSv/an font l'objet de débats scientifiques².

Par ailleurs, la radioactivité a trouvé plusieurs applications médicales en matière de diagnostic ou de traitement. La médecine nucléaire, la radiothérapie interne vectorisée, la curiethérapie, font usage de sources radioactives pour localiser et détruire les tumeurs cancéreuses.

Médecine nucléaire -radiothérapie interne vectorisée - curiethérapie

La médecine nucléaire repose sur l'administration aux patients d'une substance radioactive spécifique pour étudier un organe ou une fonction de l'organisme.

La localisation, dans l'organisme de la substance radioactive administrée se fait par un détecteur spécifique (caméra TEP, gamma-caméra). Cela permet d'obtenir des images du fonctionnement des tissus ou organes explorés.

La radiothérapie interne vectorisée vise à administrer une substance radioactive spécifique dont les rayonnements délivrent une dose importante à un organe cible dans un but curatif ou palliatif.

La curiethérapie consiste en l'implantation, au cœur ou au voisinage d'une tumeur, d'éléments radioactifs. Des éléments passifs (tubes en plastique, fils) sont mis en place dans la zone à traiter, soit par les voies naturelles, soit par intervention chirurgicale.

La curiethérapie permet de traiter, de façon spécifique ou en complément d'une autre technique de traitement, des tumeurs cancéreuses.

Les principaux radionucléides employés en curiethérapie, sous forme de sources scellées, sont le césium 137 et l'iridium 192 qui ont définitivement remplacé le radium 226 utilisé dans la première moitié du XXe siècle sous forme d'aiguilles ou de tubes.

²Le rapport de l'UNSCEAR (Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants), « Biological mechanisms of radiation actions at low doses – A white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work » (2012) dresse un état des lieux des recherches menées dans le domaine des effets des faibles doses. Au niveau européen, la plateforme MELODI (Multidisciplinary European Low Dose Initiative) est une structure associative rassemblant les principaux acteurs européens de la recherche sur les risques liés aux faibles doses de rayonnements ionisants.

1.7. Limites d'exposition

Pour la population, la limite annuelle d'exposition de 1 mSv, fixée par l'article R 1333-8 du code de la santé publique, en cohérence avec l'article 12 de la directive 2013/59/EURATOM du 5 décembre 2013, s'applique à la somme des doses reçues en dehors de la radioactivité naturelle et de la médecine⁴. Cette dose maximale admissible suit les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique, elle représente en moyenne environ 40 % de l'exposition naturelle. Cette dose peut être comparée aux 0,06 mSv reçus annuellement du fait des activités humaines (activités médicales exclues) ou aux 0,002 mSv représentant l'impact annuel d'une centrale nucléaire pour ses riverains.

L'exposition des travailleurs des installations nucléaires ⁵

Une partie de la population est particulièrement concernée par les risques liés à l'exposition aux substances radioactives : les travailleurs des installations nucléaires (toutes filières confondues, hôpitaux compris).

Ceux-ci se classent en deux catégories principales : les travailleurs employés directement par la structure gestionnaire du site (Orano, Andra, EDF...) et les travailleurs employés dans le cadre de la sous-traitance de certaines activités.

Pour les exploitants, la santé et la sécurité de leurs salariés relèvent d'un enjeu de développement durable prioritaire et d'une obligation réglementaire contrôlée, entre autres au titre des articles L. 125-15 et L. 125-16 du code de l'environnement.

La limite réglementaire des doses d'exposition individuelle pour les employés de catégorie A, fixée dans le cadre de la radioprotection et contrôlée par l'ASN pour le compte de l'Etat, est actuellement de 20 mSv/an. Un des instruments utilisés pour mesurer le niveau d'exposition est le dosimètre qui doit être porté en permanence par les intervenants.

A La Hague, Orano présente, par exemple, les résultats de dosimétrie moyens suivants (Orano, 2014) :

	Moyenne par salarié intervenant (mSv/homme/an)		
	Limite réglementaire : 20 mSv/homme/an		
	2012	2013	2014
Personnel AREVA NC La Hague	0,122	0,119	0,131
Autre personnel AREVA	0,235	0,164	0,158
Personnel hors groupe	0,228	0,198	0,175

Résultats statistiques de dosimétrie active opérationnelle moyenne pour les salariés intervenant sur le site de La Hague - Source : Rapport d'information sur la sûreté nucléaire et la radioprotection du site AREVA la Hague, 2014

³ Directive 2013/59/Euratom du conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants et abrogeant les directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom et 2003/122/Euratom

⁴ Si l'on appliquait cette limite à ces deux causes, on ne pourrait pas bénéficier d'un examen scanner, il faudrait renoncer à l'avion, abandonner l'alpinisme, ou ne pas habiter dans les régions granitiques de France

⁵ Données issues de l'Evaluation environnementale stratégique du PNGMDR 2016-2018



1.8. Protection contre les effets de la radioactivité : sûreté, radioprotection, concept de défense en profondeur

La sûreté nucléaire est définie à l'article L. 591-1 du code de l'environnement comme « l'ensemble des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement, à l'arrêt et au démantèlement des installations nucléaires de base ainsi qu'au transport des substances radioactives, prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets ».

La radioprotection est, quant à elle, définie au même article comme « la protection contre les rayonnements ionisants, c'est-à-dire l'ensemble des règles, des procédures et des moyens de prévention et de surveillance visant à empêcher ou à réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants produits sur les personnes, directement ou indirectement, y compris par les atteintes portées à l'environnement ».

La sûreté nucléaire et la radioprotection obéissent à des principes et démarches mis en place progressivement et enrichis continuellement du retour d'expérience. En matière de sûreté, la défense en profondeur est le principal moyen de prévenir les accidents et de limiter leurs conséquences éventuelles. Elle consiste à mettre en œuvre des dispositions matérielles et organisationnelles, appelées lignes de défense, organisées en niveaux consécutifs et indépendants, et capables de s'opposer au développement d'un accident. En cas de défaillance d'un niveau de protection, le niveau suivant prend le relais.

Un élément important pour l'indépendance des niveaux de défense en profondeur est la mise en œuvre de technologies différentes pour remplir la même fonction.

2. La gestion du combustible nucléaire

2.1. *Qu'est-ce que la gestion du combustible nucléaire ?*

La gestion du combustible désigne l'ensemble des opérations industrielles associées à la fabrication des assemblages de combustibles nucléaires neufs pour la production électronucléaire et à la gestion de ces derniers après leur irradiation en réacteur.

Deux grandes options de gestion du combustible sont possibles, avec des déclinaisons intermédiaires :

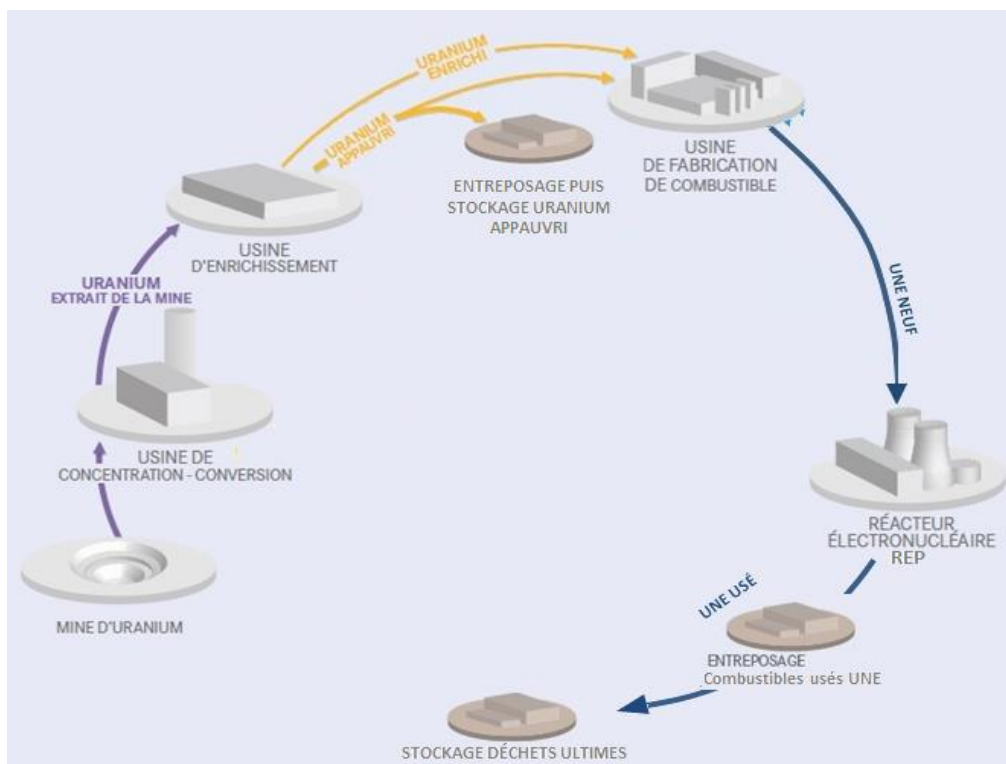
1. mise en œuvre d'une stratégie de gestion du combustible sans retraitement des combustibles usés ;
2. mise en œuvre d'une stratégie de gestion du combustible usé pour en extraire le plutonium et l'uranium et utiliser en totalité ou partiellement ces matières pour fabriquer de nouveaux combustibles.

On parle d'« amont » de la gestion du combustible pour désigner l'approvisionnement en uranium naturel (mines), les usines de conversion (ou fluoration), d'enrichissement et de fabrication du combustible, ainsi que la logistique associée.

On parle d'« aval » de la gestion du combustible pour désigner l'entreposage des combustibles usés, leur traitement, la fabrication de nouveaux combustibles à partir des matières séparées, ainsi, le cas échéant, que la logistique associée et la gestion des déchets ultimes à vie longue résultant du traitement.

2.1.1. Gestion du combustible sans retraitement

Une gestion du combustible sans retraitement des combustibles usés est une gestion dite en « cycle ouvert » :



Source : DGEC

2.1.2. Gestion du combustible avec retraitement

Une gestion du combustible avec retraitement des combustibles usés peut se décliner de plusieurs façons.

Le recyclage peut être partiel : la gestion peut alors être qualifiée de « cycle partiellement fermé » ou de « cycle partiellement ouvert ». Parmi les recyclages partiels, on trouve le « mono-recyclage ». Il consiste à recycler une seule fois les combustibles usés.

En France, la stratégie actuelle repose sur le « mono-recyclage » des combustibles UNE usés en combustibles MOx et en combustibles URE (sous certaines conditions pour ces derniers, comme l'indique la partie 2.2.3 du dossier du maître d'ouvrage).

Le rapport de présentation du cycle du combustible française du HCTISN⁷ précise que le « mono-recyclage » sous forme de MOx⁸ seul (sans URE) représente une économie de 10% d'uranium naturel.

Les combustibles UNE usés sont en effet recyclés une fois afin de séparer les déchets ultimes des matières plutonium et uranium et d'utiliser ces dernières pour produire des combustibles recyclés : le MOx et l'URE.

Un combustible UNE utilisé génère après retraitement :

- 95 % d'uranium de retraitement (URT) qui peut être réenrichi pour fabriquer de l'URE ;

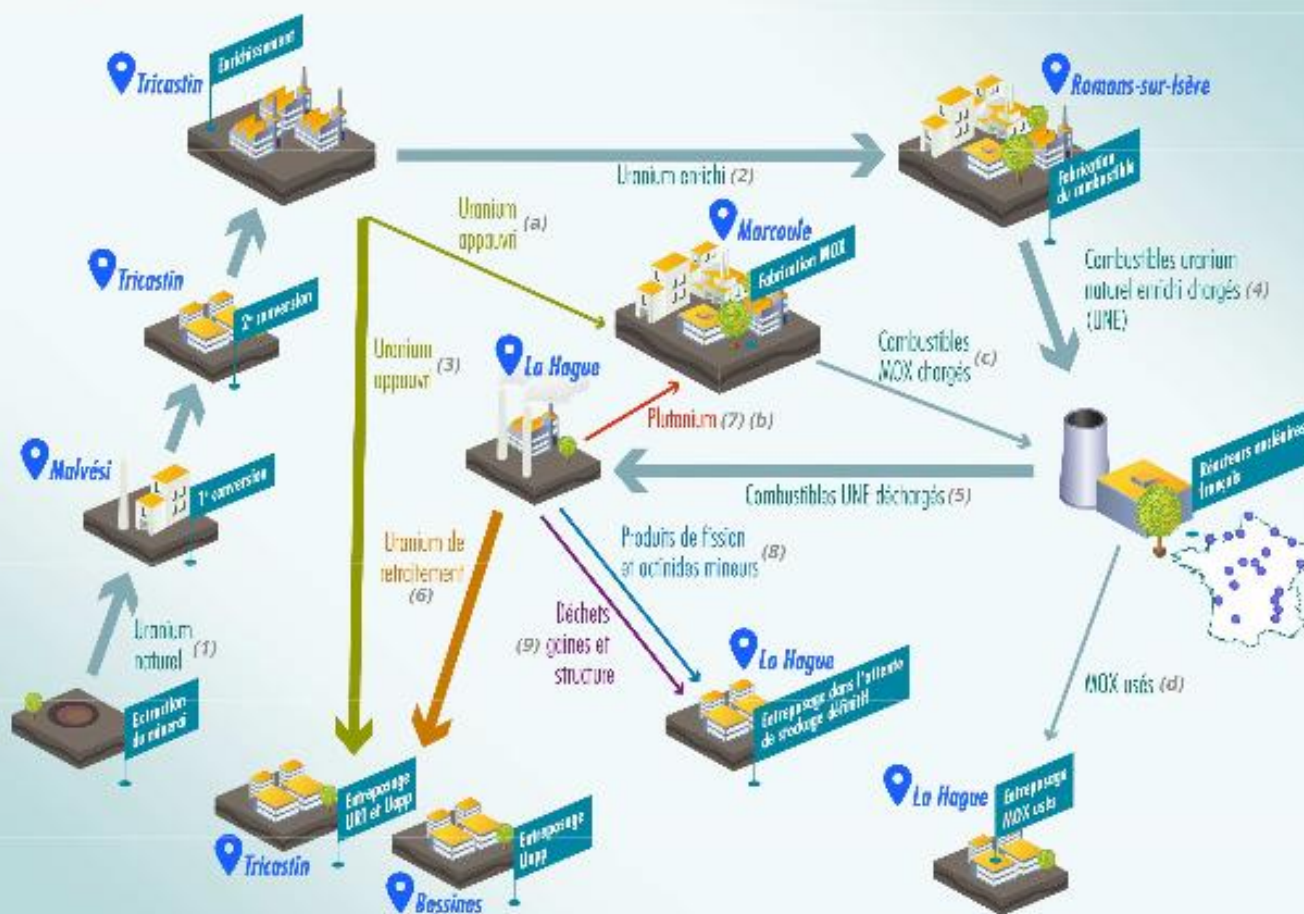
⁷ Rapport du Haut comité sur la "Présentation du "cycle du combustible" français en 2018", consultable sur le site internet du Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (http://www.hctisn.fr/article.php?id_article=41)

⁸ Ce rapport précise que ce taux s'élèverait à 16 % avec la reprise du recyclage de l'uranium de retraitement sur les 4 réacteurs de Cruas. Selon le nombre de réacteurs qui pourraient utiliser de l'URE, ce taux pourrait atteindre une fourchette de 20 à 25 % d'uranium naturel économisé.

- 1 % de plutonium, qui peut être réutilisé pour fabriquer du combustible MOx ;
- 4% de produits de fission et d'actinides mineurs, issus de captures successives de neutrons par des noyaux du combustible. Les actinides mineurs constituent des sources de radiotoxicité élevées ;
- ainsi que des déchets de structure de l'assemblage contenant le combustible, actuellement entreposés sur les sites de production assurant le retraitement des combustibles usés.

Les matières radioactives sont donc actuellement valorisées dans le parc existant (UNE usé) ou entreposées dans l'attente d'une valorisation ultérieure (MOx usé et URE usé, URT, Uapp)

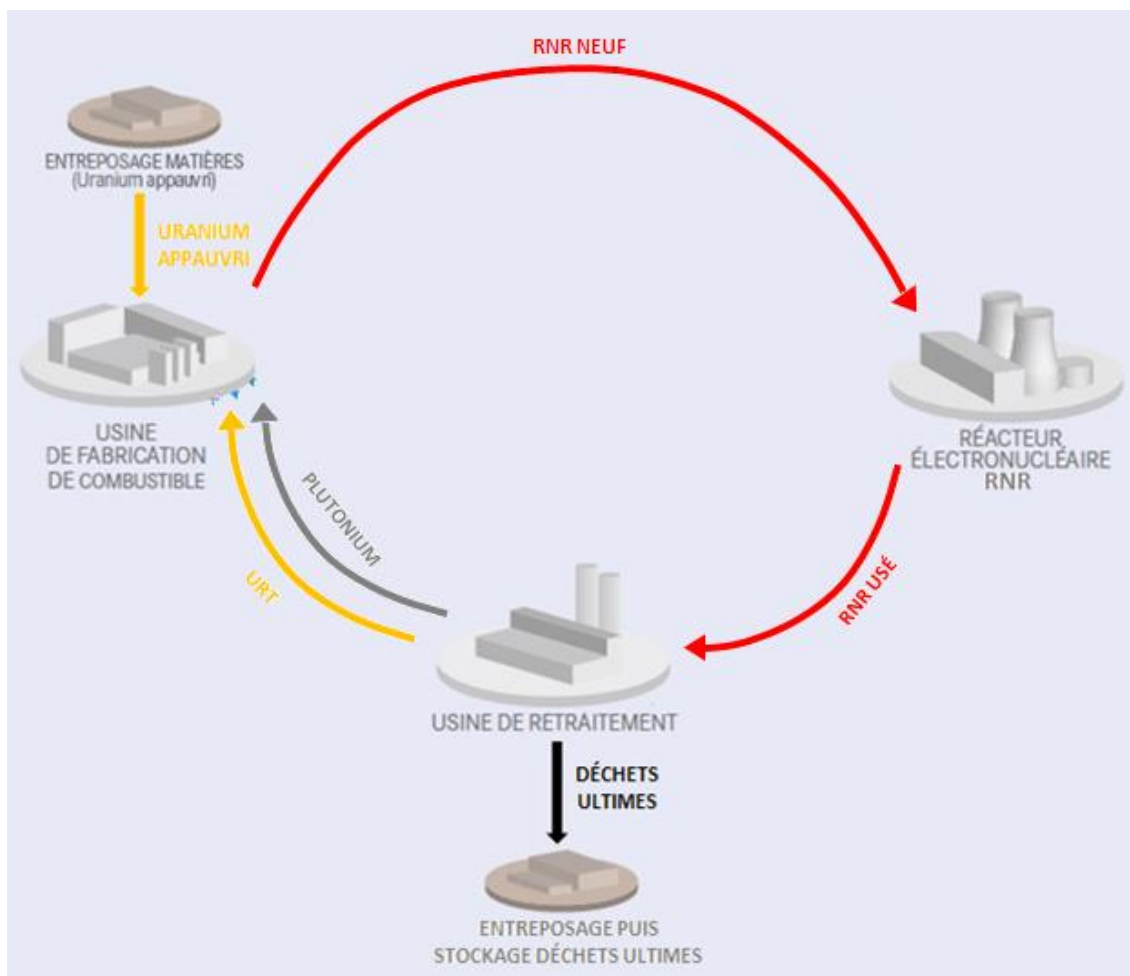
Le « cycle du combustible » nucléaire



Source : rapport du HCTISN sur le cycle du combustible

Le recyclage peut également être total. Les combustibles usés sont alors recyclés plusieurs fois après chaque passage en réacteur : on parle de « multi-recyclage ». La gestion du combustible fonctionne alors en « cycle fermé ».

Le multi-recyclage pourrait s'effectuer avec des combustibles RNR, utilisés dans un parc électronucléaire de réacteurs à neutrons rapides, qui permettrait de valoriser les MOx usés et les URE usés produits par l'exploitation du parc REP.



Des solutions de multirecyclage en réacteur REP via de nouveaux types d'assemblages de combustibles sont également en cours d'étude et pourraient présenter un intérêt pour stabiliser les quantités de plutonium présentes dans le cycle.

2.2. La France a choisi de recycler ses combustibles usés

En France, l'histoire du traitement-recyclage du combustible usé remonte à 1958, date à laquelle l'usine d'extraction du plutonium de Marcoule, dénommée UP1, a été mise en service. Exploitée par le CEA, l'usine UP1 permettait de retraiter les combustibles usés des réacteurs de la filière UNGG (uranium naturel-graphite-gaz) exploités par le CEA et EDF, afin d'en extraire le plutonium à des fins civile (combustibles Phénix et Superphénix) et militaire.

Pour pallier une éventuelle défaillance d'UP1, une nouvelle usine de retraitement, dont la construction a été lancée en 1961, vit le jour sur le site de La Hague. À la suite du choc pétrolier de 1973, le Gouvernement français décida d'orienter l'usine vers le traitement du combustible civil, le stock de plutonium militaire étant considéré comme suffisant. La première unité de traitement de combustibles irradiés, dénommée UP2-400 est mise en service. À cette époque, le Gouvernement français craignait également une baisse de la disponibilité des ressources en uranium et anticipa aussi une augmentation des besoins énergétiques. C'est dans cette optique que furent réalisés les projets de réacteurs à neutrons rapides (filière déjà expérimentée avec le réacteur expérimental Rapsodie conçu à la fin des années 50) Phénix (1973-2010) et Superphénix (1984-1997), dont les possibilités de fonctionnement en



« surgénération » (quantité de plutonium produite par le réacteur supérieure à celle qu'il consomme) offraient des perspectives en termes d'indépendance énergétique.

Cette filière de réacteurs visait à permettre à la France de fermer son cycle en contrôlant son stock de plutonium, en maîtrisant sa production de déchets ultimes et en assurant son indépendance énergétique. Les installations du cycle s'adaptèrent donc à cette stratégie. Ainsi, en 1976, le CEA, propriétaire du site de La Hague, céda l'usine, constituée uniquement de l'installation UP2-400, à sa filiale Cogéma pour qu'elle puisse retraiter les combustibles usés du parc d'EDF et de l'étranger. L'usine fit alors l'objet d'importants travaux pour augmenter sa capacité de traitement avec la construction des nouvelles unités de traitement UP3 et UP2-800, autorisées par décrets en 1981, qui entrèrent respectivement en service en 1990 et 1994.

Dans les années 2000-2010, le périmètre de l'activité de retraitement a évolué. Les capacités de traitement d'UP2-800 et d'UP3 ont été augmentées, pour atteindre une limite en masse de combustible traité maximale par an de 1700 tML/an en 2003. Par ailleurs, les activités de démantèlement des installations les plus anciennes ont commencé en 2009, notamment l'usine UP2-400, mise à l'arrêt définitif en 2004. Le démantèlement comprend le conditionnement des déchets anciens produits par le fonctionnement de l'installation, pour permettre leur évacuation vers une filière de stockage adaptée.

Le site de La Hague est soumis depuis plusieurs années à des programmes d'optimisation de ses activités, notamment du fait d'un surdimensionnement des installations du site (la production actuelle est de l'ordre de 1100 tonnes pour une capacité maximale autorisée de 1700 tonnes). EDF assure aujourd'hui la grande majorité des volumes traités..

La France est l'un des seuls pays dans le monde à maîtriser l'intégralité des technologies nécessaires au retraitement des combustibles usés.

2.3. L'amont du cycle du combustible en France

Afin de permettre la fabrication de combustibles utilisables dans les réacteurs, le minerai d'uranium doit subir un certain nombre de transformations chimiques, de la préparation du « yellow cake » jusqu'à la conversion en UF₆, forme sous laquelle il est enrichi.

Les étapes de l'amont du cycle sont dans l'ordre :

- l'approvisionnement en uranium naturel issu de l'exploitation des gisements d'uranium. Le minerai d'uranium extrait des mines est traité chimiquement et mis sous la forme d'un concentré solide d'uranium contenant 70 à 80 % d'uranium appelé « yellow cake » ;
- la conversion qui consiste à transformer les concentrés d'uranium naturel en hexafluorure d'uranium (UF₆) ;
- l'enrichissement qui consiste à porter la concentration naturelle en uranium 235, matière fissile, de 0,71 % à une valeur comprise entre 3 et 5 %. De cette étape sont issus l'uranium enrichi et de l'uranium appauvri (Uapp) ;
- la fabrication des assemblages combustibles ;
- la France dispose de plusieurs usines pour chacune de ces étapes : usines de conversion de Malvési et sur le site du Tricastin et usine d'enrichissement Georges Besse 2 exploitées par Orano Cycle, ainsi que l'usine de fabrication de Romans-sur-Isère exploitée par Framatome.

2.4. L'aval du cycle du combustible en France



Les assemblages de combustibles irradiés dans les réacteurs nucléaires sont traités dans les usines de retraitement de La Hague, exploitées par Orano. Les usines de retraitement comprennent plusieurs unités industrielles, chacune destinée à une opération particulière.

A leur arrivée, les combustibles irradiés sont entreposés sous eau dans des piscines pour refroidissement. Ils sont ensuite cisailés et dissous dans de l'acide nitrique afin de séparer les fragments de gaine métallique du combustible usé. Les morceaux de gaines, insolubles dans l'acide nitrique, sont transférés vers une unité de compactage et de conditionnement. La solution d'acide nitrique comprenant les substances radioactives dissoutes est ensuite traitée afin d'en extraire l'uranium et le plutonium et d'y laisser les produits de fission et les actinides mineurs.

Après purification et concentration, l'uranium est entreposé sous forme de nitrate d'uranyle. Il est converti sous forme solide d'oxyde d'uranium dans une installation de conversion, TU5, au Tricastin.

Après purification, concentration, puis mise en œuvre de procédés chimiques et thermiques, le plutonium est entreposé sous forme d'oxyde de plutonium, dans l'attente de son utilisation dans l'usine Melox exploitée par Orano à Marcoule pour la fabrication du combustible MOx.

Les solutions de haute activité, contenant les produits de fission et les actinides mineurs issus du retraitement sont concentrées, calcinées puis vitrifiées et conditionnées en colis standards de déchets vitrifiés (CSD-V).

Les matériaux métalliques constitutifs de la structure de l'assemblage du combustible usé (coques et embouts) sont isolés, décontaminés puis compactés en ligne et conditionnés sous la forme de colis standards de déchets compactés (CSD-C).

Ces déchets (CSD-C et CSD-V) sont des déchets à vie longue et sont actuellement entreposés dans des installations dédiées sur le site de La Hague, dans l'attente d'une solution définitive de stockage (Cigéo).

Les opérations de retraitement produisent des effluents liquides et gazeux, qui font l'objet de traitement avant d'être rejetés, après contrôle, dans le respect des limites autorisées par l'ASN⁹.

2.5. Les enjeux économiques des différentes options de recyclage des combustibles usés d'EDF

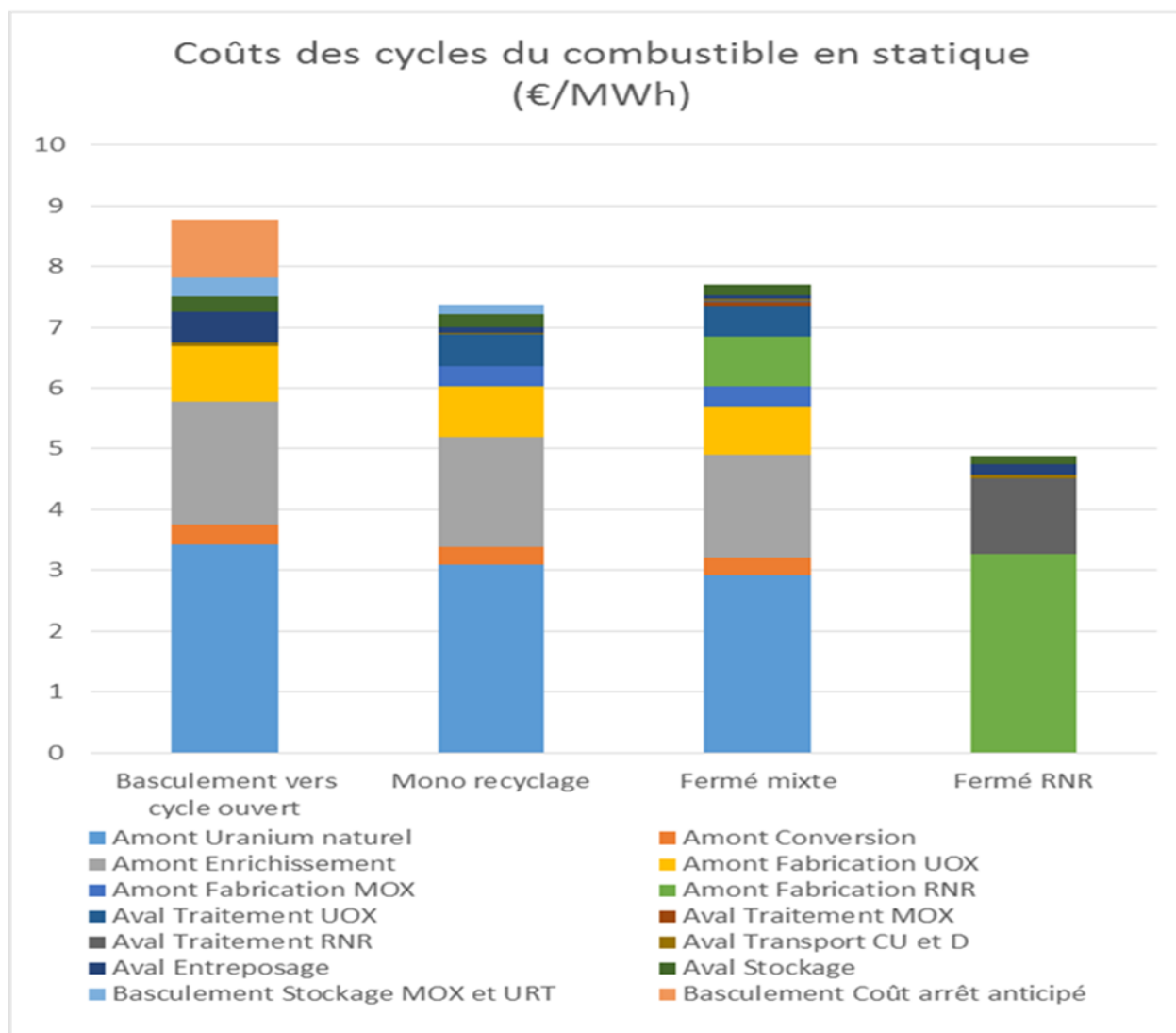
Le gouvernement a mené des réflexions en 2015 en vue de comparer les trois scénarios de recyclage des combustibles usés (cycle ouvert, mono-recyclage et cycle fermé). Deux approches avaient été étudiées :

- la première consistait à mesurer le coût du cycle à l'aide d'un critère unique exprimé en coût actualisé ramené à la production électrique (€/MWh) ;
- la deuxième, multicritères, essayait d'intégrer dans un éventuel processus de décision, des aspects macroéconomiques, environnementaux et sociétaux.

Ces travaux montraient que le coût de l'amont du cycle (fourniture de la matière nucléaire, fabrication du combustible), par rapport à celui de l'aval (traitement, entreposage, stockage) était prépondérant. Compte tenu du choix du mono-recyclage fait par la France et donc de la présence d'installations de traitement-recyclage, la stratégie visant à promouvoir un cycle fermé tendait à diminuer, à l'équilibre, le coût de cycle.

⁹ Décision n° 2015-DC-0536 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 22 décembre 2015

Par ailleurs, l'étude montrait que l'écart de coût (4 €/MWh) entre un cycle ouvert et un cycle fermé restait faible par rapport au coût total de production de l'électricité nucléaire (estimé à 60 €/MWh - Cour des comptes 2014).



Source : Etude I-Tésé menée pour le gouvernement

L'approche multicritères intégrait, quant à elle, des facteurs macroéconomique, environnementaux (volumes stockés, dosimétrie) et sociétaux (sécurité d'approvisionnement, non-prolifération, emplois).

Ces travaux sont restés très prospectifs mais permettaient d'apporter des premiers ordres de grandeur quant aux impacts socio-économiques liés aux enjeux de la stratégie de cycle du combustible.

Pour faire suite à ces travaux, plusieurs études ont été engagées sur ces aspects et notamment :

- pour chacun des producteurs : coûts de gestion détaillés des combustibles usés et des déchets radioactifs produits. Ces informations relèvent de données commerciales et industrielles et ne sont pas publiques ;
- coûts d'un stockage de l'uranium appauvri, coût d'un stockage de l'uranium de retraitement. L'échéance de remise de ces études est au 31 décembre 2019 ;
- faisabilité technico-économique du multi-recyclage des combustibles MOX et URE ;

- 
- coût du stockage direct des combustibles usés de tout type comparé au coût de leur traitement.
L'échéance de remise de cette étude est mi-2019.

Ces études ont été prescrites dans le cadre du PNGMDR 2016-2018 qui couvre d'autres aspects que les seuls aspects économiques.

Des données relatives aux enjeux environnementaux des différents cycles sont présentées dans le livret « Approfondir ses connaissances ».