

# GESTION des DÉCHETS RADIOACTIFS

---

## 1 – Matière radio actives

### 1-1-radioactivité

La radioactivité est un phénomène naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables se transforment, après une série de désintégrations, en noyaux atomiques stables. Ces transformations s'accompagnent de l'émission de rayonnements ionisants. Il existe des sources de radioactivité naturelles (granit, rayonnement cosmique...) et artificielles (réacteurs de production d'électricité nucléaire, activités médicales de radiothérapie...).

#### 1-1-1- Substance radioactive

Parmi les substances radioactives, certaines sont des matières et d'autres sont des déchets. Une « substance radioactive » est une substance qui contient des radionucléides, naturels ou artificiels, dont l'activité ou la concentration justifie un contrôle de radioprotection. Parmi ces substances radioactives, il en existe certaines pour lesquelles une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée (le cas échéant après traitement) : il s'agit alors de « matière radioactive ». A l'inverse les « déchets radioactifs » sont définis comme les substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée

#### 1-1-2 -déchet radioactif

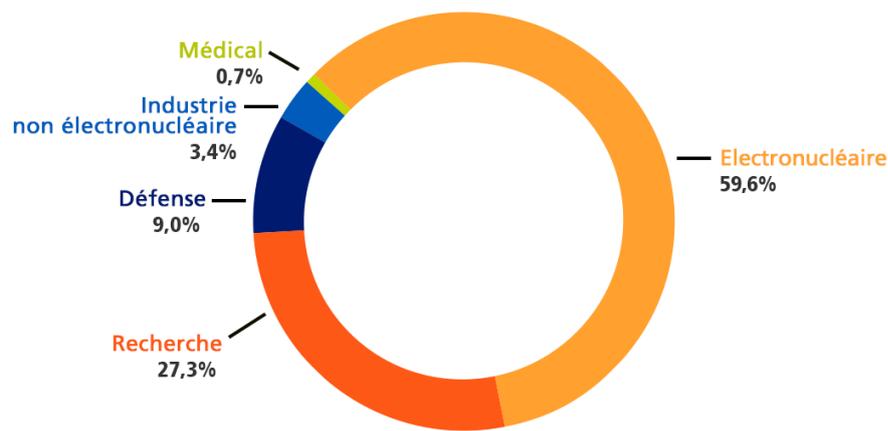
On appelle déchet radioactif toute matière radioactive qui ne peut plus être ni recyclée ni réutilisée. Du fait de leur radiotoxicité, potentiellement dangereuse pour l'homme et pour l'environnement, les déchets radioactifs sont gérés de façon spécifique. Cette gestion est encadrée par la Loi. 90 % des déchets radioactifs (en volume), produits en France, disposent déjà d'une filière de gestion en stockage ultime. Les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA et MA-VL) n'ont pas encore de filières définitives de stockage. Ils sont conditionnés et entreposés par leurs producteurs, dans l'attente d'un site de stockage définitif.

#### 1-1-3 – origine de déchets

Les matières et déchets radioactifs sont principalement issus de cinq secteurs économiques

- **le secteur électronucléaire** : principalement les centrales nucléaires de production d'électricité d'EDF, ainsi que les usines dédiées à la fabrication et au traitement du combustible nucléaire Matériaux issus du démantèlement d'installations nucléaires,
- **le secteur de la recherche** : la recherche dans le domaine du nucléaire civil (notamment les activités de recherche du CEA), les laboratoires de recherche médicale, de physique des particules, d'agronomie, de chimie... ;

- **Le secteur de la défense** : principalement les activités liées à la force de dissuasion, dont la propulsion nucléaire de certains navires ou sous-marins, ainsi que les activités de recherche associées
- **le secteur industriel non électronucléaire** : notamment l'extraction de terres rares, la fabrication de sources scellées, mais aussi diverses applications comme le contrôle de soudure, la stérilisation de matériel médical, la stérilisation et la conservation de produits alimentaires...
- **le secteur médical** : les activités thérapeutiques, de diagnostic et de recherche. Imagerie radiothérapique



Répartition par secteur économique  
des déchets radioactifs existants à fin 2018  
Source ANDRA - Inventaire national

© EDF

## 1-2 -Classement des déchets

### 1-2-1-principe

Les déchets radioactifs sont classés selon deux critères :

- **Leur durée de vie, calculée en fonction de la « période radioactive » des radioéléments contenus** : la période est le temps au bout duquel la quantité d'un même radionucléide est divisée par deux.
  - Déchets à vie courte (VC <31ans)
  - Déchets à vie longue (VL(>31ans))
  - Déchets à vie très courte en médecine (<100jours)
- **Leur niveau de radioactivité, exprimé en becquerels (Bq)**: cela correspond au nombre de désintégrations d'atomes par seconde. On distingue 4 niveaux d'activités différentes : haute activité (HA), moyenne activité (MA), faible activité (FA) et très faible activité (TFA).

### 1-2-2- Classification

- ✓ **Les déchets de haute activité (HA)**, principalement issus des combustibles usés après traitement. Ils sont conditionnés en colis de verre ;
- ✓ **Les déchets de moyenne activité à vie longue (MA+VL)**, également principalement issus des combustibles usés après traitement et des activités d'exploitation et de maintenance des usines de traitement du combustible. Il s'agit de déchets de structure, des coques et embouts constituant la gaine du combustible nucléaire, conditionnés dans des colis de déchets cimentés ou compactés, ainsi que de déchets technologiques (outils usagés, équipements...) ou encore de déchets issus du traitement des effluents comme les boues bitumées ;
- ✓ **Les déchets de faible activité à vie longue (FA+VL)**, essentiellement des déchets de graphite et des déchets radifères. Les déchets de graphite proviennent principalement du démantèlement des réacteurs de la filière uranium naturel graphite gaz. Les déchets radifères sont en majorité issus d'activités industrielles non électronucléaires (comme le traitement de minéraux contenant des terres rares).
- ✓ **Les déchets de faible activité et moyenne activité à vie courte (FMA-VC)**, essentiellement issus de l'exploitation, de la maintenance et du démantèlement des centrales nucléaires, des installations du cycle du combustible, des centres de recherche et pour une faible partie des activités de recherche médicale ;
- ✓ **Les déchets de très faible activité (TFA)**, majoritairement issus de l'exploitation, de la maintenance et du démantèlement des centrales nucléaires, des installations du cycle du combustible et des centres de recherche ;
- ✓ **Les déchets à vie très courte**, provenant principalement du secteur médical ou de la recherche. Ils sont entreposés sur leur site d'utilisation le temps de leur décroissance radioactive, avant élimination dans une filière conventionnelle correspondant à leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques.

### 1 – 3 - Mode de traitement



		Déchets dits à vie très courte contenant des radioéléments de période < 100 jours	Déchets dits à vie courte dont la radioactivité provient principalement des radioéléments de période ≤ 31 ans	Déchets dits à vie longue contenant majoritairement des radioéléments de période > 31 ans
Centaines Bq/g	Très faible activité (TFA)	Gestion par décroissance radioactive sur le site de production  <i>puis élimination dans les filières de stockage dédiées aux déchets conventionnels</i>	Recyclage ou stockage dédié en surface <i>(installation de stockage du centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage de l'Aube)</i>	
Millions Bq/g	Faible activité (FA)		Stockage de surface <i>(centre de stockage des déchets de l'Aube)</i>	Stockage à faible profondeur <i>(à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)</i>
Milliards Bq/g	Moyenne activité (MA)			
	Haute activité (HA)	Non applicable <sup>1</sup>	Stockage en couche géologique profonde <i>(en projet dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)</i>	

<sup>1</sup>Les déchets de haute activité à vie très courte n'existent pas.

## 1-4 – Formes des différents types de déchets

### 1-4-1 – Gaz radioactifs

**Le radon**, gaz radioactif naturel, est libéré au cours de l'extraction et du traitement du minerai d'uranium et de l'enrichissement de l'uranium. Les techniques ont été améliorées et permettent de réduire encore les faibles doses de radiations émises. Les petites quantités de gaz radioactifs produits dans les réacteurs proprement dits sont maintenues sous pression dans des réservoirs d'attente pour permettre la désintégration de leurs composantes à durée de vie courte, et filtrées avant d'être libérées. Les effluents gazeux faiblement radioactifs qui résultent de ce processus sont dispersés au moyen de cheminées étroitement surveillées. On dispose de techniques qui permettent d'immobiliser les composantes à durée de vie plus longue jusqu'à ce que leur évacuation soit praticable.

### 1-4-2 -Des liquides faiblement radioactifs

*Des liquides faiblement radioactifs* dérivent du fonctionnement des réacteurs et des usines de retraitement. Ils contiennent des traces des produits de fission et d'activation venant du combustible et des piscines de désactivation où

ce dernier est stocké, et demandent à être traités avant leur rejet. Les techniques employées concentrent la radioactivité sous une forme solide ou liquide dont le confinement est possible et les effluents liquides résiduels de faible activité sont dispersés après un confinement adéquat, si nécessaire, conformément aux autorisations relatives au site.

Les THA concernent les *déchets liquides* qui renferment les produits de fission et les actinides mineurs. Ils sont traités par évaporation suivie d'une calcination qui transforme la plupart des éléments en oxyde. Le calcinat obtenu, mélangé à la "fritte de verre" borosilicatée [1], est chauffé par induction dans un pot à environ 1 100°C, puis coulé à chaud dans un conteneur en acier réfractaire, fermé par un couvercle soudé, formant le *colis de déchet standard vitrifié* : CSD-V

## 1-5- Filières de gestion des déchets radioactifs

Le financement de la gestion des déchets radioactifs revient aux producteurs, selon le principe du "pollueur-payeur". Selon l'Andra, on compte environ **1 200 producteurs de déchets radioactifs en France**, les plus importants étant Électricité de France (EDF), Orano (anciennement Areva) et le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), qui assure au nom de l'État la réglementation et le contrôle du nucléaire en France, veille à la sûreté de ces activités.

**Plusieurs solutions ont été trouvées pour isoler ces déchets le temps que leur radioactivité ait suffisamment diminué** et ne présente plus de risque potentiel pour l'homme et l'environnement.

### 1 -5-1 -l'immersion dans les océans

Après la Seconde Guerre Mondiale, **l'immersion dans les océans a été la première solution utilisée par 14 pays**, dont la France, pour faire face à l'accumulation des déchets nucléaires. Ces déchets étaient coulés dans du béton ou confinés dans des fûts avant d'être immergés dans les profondeurs des océans Pacifique, Atlantique et Arctique. L'immersion était alors considérée comme sûre par la communauté scientifique en raison du volume important des océans qui devait permettre de diluer la radioactivité.

En 1993, les signataires de la **Convention de Londres sur la prévention de la pollution des mers** décident d'interdire définitivement l'immersion des déchets radioactifs. À ce jour, **les déchets qui ont été immergés demeurent toujours au fond des océans.**

Les déchets radioactifs qui ont fait l'objet d'immersions se présentent sous plusieurs formes :

- **des déchets liquides**, directement évacués en mer sur des sites dédiés ou mis en conteneurs mais non solidifiés ;

- **des déchets solides** non conditionnés ou, pour la plupart, emballés, généralement dans des fûts métalliques, après incorporation dans une matrice de béton ou de bitume, conformément aux recommandations de l'AIEA. Il s'y ajoute des cuves de réacteurs nucléaires, contenant éventuellement du combustible, provenant des États-Unis ou de l'ex-URSS

## 1 – 5 -2 – stockage en surface

La première étape de la mise en stockage en surface consiste à conditionner les déchets sous forme de colis, c'est-à-dire qu'ils sont **enfermés dans un conteneur en acier ou en béton** après avoir subi différents traitements : incinération, compactage, vitrification, etc. C'est la première des trois barrières de protection.

Ils sont ensuite **confinés à la surface de la terre** dans des ouvrages de stockage en béton armé, c'est la deuxième barrière de protection. La géologie du site constitue la dernière barrière naturelle servant à protéger l'homme et l'environnement. Une fois remplis de colis, ces ouvrages sont fermés par une couverture définitive composée de plusieurs couches de matériaux naturels comme l'argile afin de les protéger des intempéries et garantir la sûreté du stockage à long terme.

## 2 – Modes de gestion

Les déchets radioactifs présentent une diversité importante selon leur forme physique et chimique, leur radioactivité et la période des radionucléides en cause, mais aussi selon leur volume. En France, chaque catégorie de déchets est gérée dans une filière particulière qui comprend une série d'opérations comme le tri, le traitement, le conditionnement, l'entreposage et le stockage

- ✓ **Le tri** : permet de séparer les déchets selon leurs caractéristiques notamment la période radioactive des radionucléides qu'ils contiennent. Il conduit également à séparer les déchets que l'on peut compacter, incinérer ou fondre pour en réduire le volume.
- ✓ **Le traitement et le conditionnement** : selon leur nature, les déchets subissent des traitements différents (incinération, calcination, fusion, compactage, cimentation, vitrification, etc.). Puis ils sont enfermés dans un conteneur. On aboutit ainsi à un objet appelé « **colis** » de déchets radioactifs.
- ✓ **L'entreposage et le stockage** : les installations d'entreposage sont conçues pour accueillir les colis de déchets pendant une durée limitée. Le stockage est le stade ultime d'une filière et suppose le dépôt définitif des colis ou, du moins, l'absence d'intention de les reprendre. Cela signifie naturellement que les dispositions retenues doivent permettre de protéger l'homme et l'environnement aussi bien à court qu'à très long terme.

### 2 -1 – Procédés de traitement

**2 – 1 -1- Compactage** Le compactage est destiné à réduire le volume de certains déchets solides, notamment métalliques ou plastiques. Ce procédé utilise des presses de différentes technologies et de capacités allant de quelques centaines

de tonnes à quelques milliers de tonnes, en fonction de la nature des déchets à compacter. Après compactage, les déchets sont mis en conteneur et éventuellement bloqués par un liant hydraulique.

**2 -1 -2 – Évaporation** Avant conditionnement, les déchets liquides sont parfois, lorsque leurs caractéristiques chimiques le permettent, concentrés par chauffage et évaporation, ce qui permet d'en réduire le volume. Les concentrats ainsi obtenus sont ensuite conditionnés directement, par cimentation ou bitumage par exemple. L'évaporation est généralement intégrée, sur le site des producteurs, à l'installation mettant en œuvre le conditionnement retenu pour les concentrats.

**2 – 1 – 3 – Incinération** L'incinération permet de réduire de façon significative la masse et le volume des déchets et de concentrer leur radioactivité dans les cendres. Elle est particulièrement adaptée aux déchets liquides aqueux et organiques, aux solvants ou aux liquides de scintillation ainsi qu'aux déchets solides organiques, de très faible activité (TFA) ou de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC). L'installation Centraco de Cyclife à Codolet, en service depuis 1999, permet ainsi par exemple d'incinérer des déchets liquides et solides.

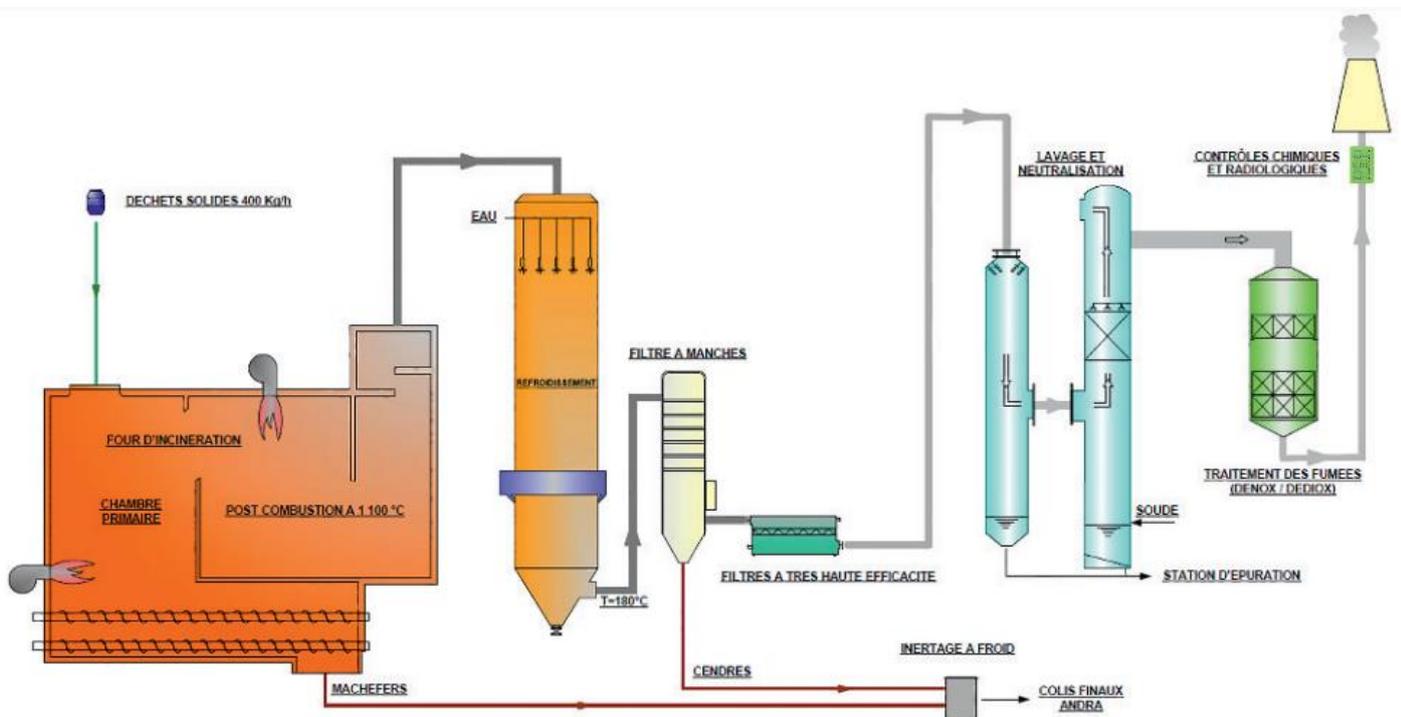


Schéma de principe du procédé d'incinération © Centraco de Cyclife

## 2 – 1 – 4 – Fusion

Comme l'incinération, la fusion permet de réduire le volume de déchets et de décontaminer partiellement ces déchets qui peuvent ensuite éventuellement être recyclés au sein de la filière électronucléaire. La fusion est utilisée pour le traitement de déchets métalliques. La fusion est pratiquée, par exemple, sur l'installation Centraco de Cyclife pour traiter des déchets en acier ou en métal

non ferreux provenant des opérations de maintenance ou de démantèlement des installations nucléaires.

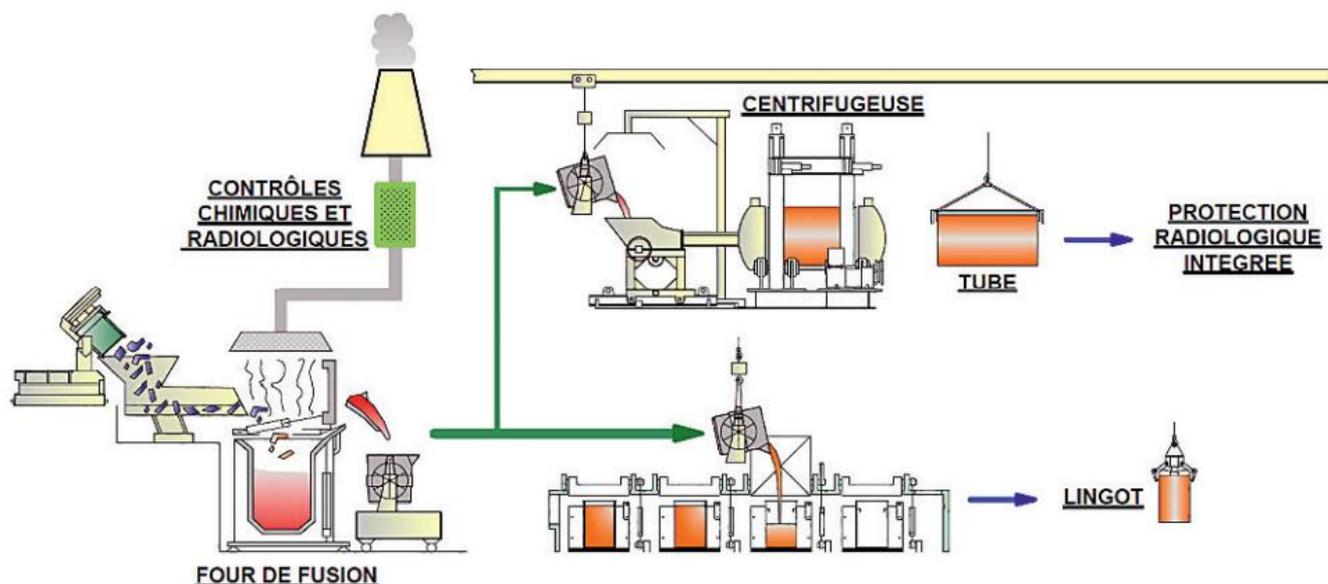


Schéma de principe du procédé de fusion © Centraco de Cyclife

## 2 – 2 – Procédé de conditionnement

### 2 – 2 – 1 – cimentation

Le procédé de cimentation est utilisé pour :

- Bloquer des déchets solides tels que des déchets technologiques,
- Des déchets activés et
- Des déchets de structure.

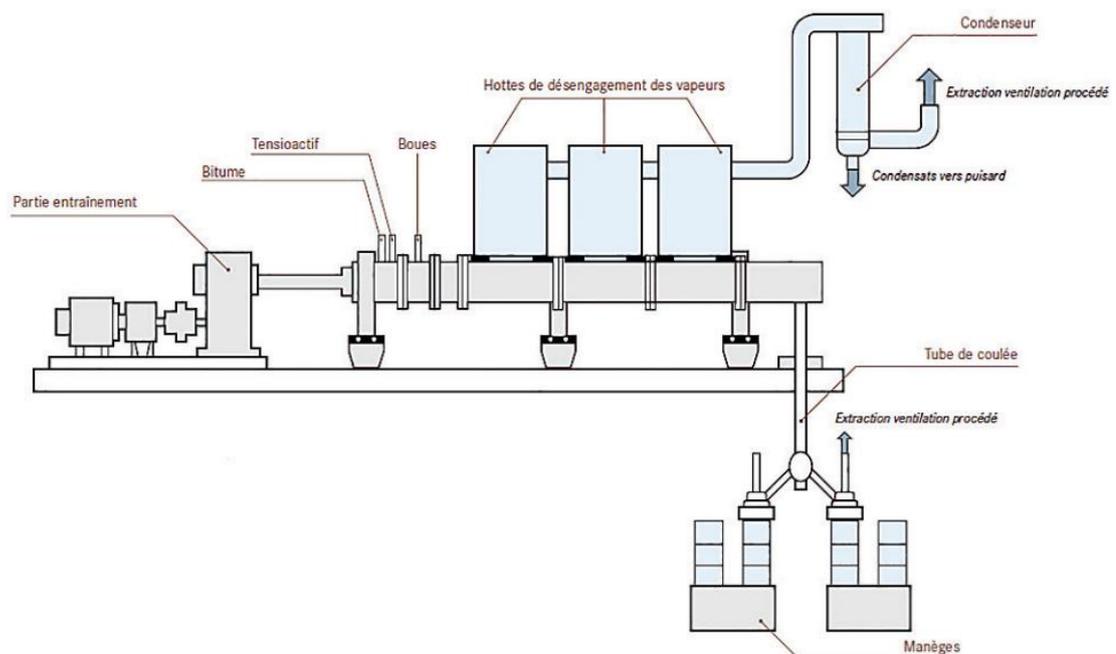
Il produit dans ce cas des **colis de déchets** dits hétérogènes ;

- Enrober des déchets en solution
- ou sous forme pulvérulente :
  - Concentrats d'évaporation,
  - Boues de traitements chimiques,
  - Résines échangeuses d'ions, etc.

Les colis de déchets ainsi fabriqués sont dits homogènes. Il s'agit du procédé de conditionnement le plus largement utilisé. En effet, les matrices cimentaires réunissent de nombreux facteurs favorables : disponibilité, coût modeste, simplicité de mise en œuvre, bonne résistance mécanique et, en général, stabilité dans le temps. La cimentation est ainsi largement mise en œuvre sur les sites des producteurs de déchets (sur les sites de La Hague, de Cadarache, de Marcoule, etc.). Ce procédé est également pratiqué sur les sites de l'Andra au Cires et au CSA.

### 2 – 2 -2 -Bitumage

Le procédé d'enrobage par bitumage consiste à mélanger, à chaud, des déchets se présentant sous forme de boues à du bitume. Le mélange obtenu est déshydraté et coulé dans un conteneur où il est refroidi. Le bitume présente des propriétés intéressantes au regard de son pouvoir agglomérant élevé, sa grande inertie chimique, son imperméabilité, sa faible solubilité dans l'eau, son pouvoir de confinement important, son coût modéré et, enfin, sa disponibilité. Ce procédé est mis en œuvre sur les sites des producteurs de déchets essentiellement pour conditionner les boues de précipitation résultant du traitement des effluents liquides. Il est aujourd'hui remplacé en grande partie par la cimentation ou la vitrification en fonction de la nature des déchets à traiter.

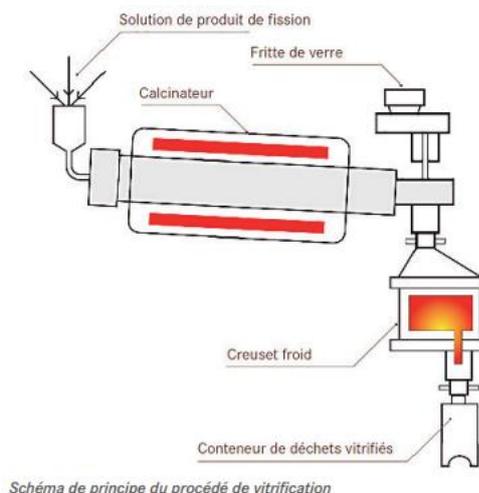


*Schéma de principe du procédé de bitumage*

## 2 – 2 – 3 – vitrification

La vitrification consiste à mélanger dans un creuset et à haute température des déchets radioactifs généralement liquides, préalablement calcinés, à une fritte de verre dont la composition est adaptée à la nature chimique des déchets afin d'intégrer, à l'échelle atomique, tous les radionucléides présents dans les déchets au réseau vitreux de manière homogène. Le mélange ainsi obtenu est ensuite coulé dans un conteneur en acier inoxydable. Du fait de sa composition chimique et de sa structure amorphe, le verre se révèle particulièrement résistant à l'échauffement et à l'irradiation, et présente une bonne durabilité chimique sur de longues durées. Mis en œuvre depuis plusieurs décennies sur les sites de Marcoule et de La Hague, ce procédé est aujourd'hui la référence industrielle pour le conditionnement des solutions de produits de fission issues du retraitement des combustibles usés. Des développements technologiques, notamment autour de l'utilisation d'un creuset froid, ont

permis, d'une part, de limiter les déchets induits par le procédé et, d'autre part, d'élargir le champ d'application à d'autres types de déchets.



## 2 – 2 – 4 – enrobage par des résines polymères

En fonction de leurs caractéristiques radiologiques et physicochimiques, les déchets solides peuvent également être enrobés par une résine polymère. Ce procédé est notamment mis en œuvre pour conditionner les résines échangeuses d'ions (REI) qui sont utilisées dans les circuits de contrôle volumétrique et chimique du circuit primaire des réacteurs nucléaires, de traitement et purification des eaux de piscines et de traitement des effluents usés. Ce procédé consiste à mélanger les résines échangeuses d'ions avec une matrice époxy puis à les conditionner dans des conteneurs cylindriques en béton. Certaines REI sont peu transportables en raison de leurs caractéristiques radiologiques ou physico-chimiques. Il est alors préférable de déplacer le procédé de traitement plutôt que les déchets. En ce sens, les machines mobiles conçues par Centraco de Cyclife permettent de les conditionner dans le respect des spécifications de l'Andra.

## 2 -2 – 5 – Conteneurs

### 2-2-5-1 – Container IP2 type A

Si un container standard est adapté au stockage et au transport de la majorité des produits dangereux, il n'est en revanche pas apte au stockage et au transport des matières radioactives, sauf à subir un aménagement adapté et normé. C'est containers adaptés ce sont les containers dits **IP2 et Type A**, des conteneurs aménagés et pensés pour ce type de marchandise afin de pouvoir assurer leur transport ou leur stockage dans le plus strict respect des normes de sécurité. Les conteneurs de ce type assurent une étanchéité totale en cas de fuite de matière radioactive à l'intérieur. Également ils permettent de stocker des éléments radioactifs tout en garantissant une totale sécurité pour les personnes et les biens circulant près dudit container. C'est containers

adaptés ce sont les containers dits **IP2 et Type A**, des conteneurs aménagés et pensés pour ce type de marchandise afin de pouvoir assurer leur transport ou leur stockage dans le plus strict respect des normes de sécurité.

Les conteneurs de ce type assurent une étanchéité totale en cas de fuite de matière radioactive à l'intérieur. Également ils permettent de stocker des éléments radioactifs tout en garantissant une totale sécurité pour les personnes et les biens circulant près dudit container.



Les containers IP 2 et Type A possèdent un **plancher constitué d'une tôle en acier inoxydable** de 4 mm d'épaisseur dont les soudures continues et totalement étanches sont réduites au minimum pour faciliter les décontaminations. L'intérieur est doté de nombreux dispositifs d'arrimage afin d'éviter aux lots stockés de basculer durant la manipulation du container ou son transport. Les parois intérieures et extérieures sont recouvertes **d'une peinture décontaminable** répondant aux normes en vigueur. Tous les colis présents dans ce type de containers doivent être des colis spécialement conçus pour cette catégorie de marchandises. Si les containers garantissent une protection face au risque de dangerosité des matières de cette classe, **tous ce qui est dans le conteneur doit être systématiquement emballé dans un colisage agréé.**

#### **2-2-5-2 – colis**

Un **colis de déchets** est en général constitué de trois éléments : un **déchet radioactif**, un matériau d'immobilisation (verre, béton, résine ou bitume) et le conteneur en métal, béton, plastique... Ce conditionnement vise à assurer la sûreté de la manutention, de l'entreposage, du transport et du stockage.

Les colis contenant les déchets de haute activité ou de moyenne activité à vie longue (HA, MA-VL) sont les plus complexes. À l'opposé, certains déchets de très faible activité (TFA) sont rassemblés dans des grands sacs appelés big-bags.

Entre ces deux extrêmes, il y a toute la diversité des colis de déchets de faible et moyenne activités (FMA) : fûts ou caissons métalliques, cubes ou coques en béton... Il existe ainsi plusieurs centaines de type de colis



*Fûts en inox pour les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL).*



Conteneurs de déchets HA - DR



classe A (sources radioactives) -



type B

### 2-2-5-3 – transport des déchets radioactifs

Les transports de substances radioactives sont encadrés par **des réglementations spécifiques qui fixent notamment une classification des substances et des colis ainsi que des exigences visant à la maîtrise de la sûreté**, en conditions de transport de routine, mais également en cas d'incident ou d'accident.

Le transport des colis de substances radioactives à usage civil est encadré par une réglementation internationale, à savoir le « **Règlement type sur le transport des marchandises dangereuses** », aussi appelé « **Livre orange** », publié par l'Organisation des Nations Unies (ONU). Ce livre regroupe les exigences de sûreté relatives aux neuf classes de matières dangereuses.

Ces exigences, qui sont non juridiquement contraignantes, sont déclinées en règlements spécifiques à chaque mode de transport - route, chemin de fer, voie de navigation intérieure, mer ou air - qui font l'objet d'**arrêtés et de directives établies au niveau national ou européen**. En France, l'**Autorité de sûreté nucléaire (ASN)** est en charge du contrôle de l'application de la réglementation de la sûreté des transports de substances radioactives à usage civil.

### **3 – Gestion des déchets à vie longue à haute activité**

Trois voies de recherche (appelées aussi « axes ») avaient été retenues par la loi du 30 décembre 1991 concernant le devenir des déchets radioactifs de haute activité à vie longue :

- la séparation-transmutation (axe 1),
- le stockage en formation géologique profonde (axe 2),
- le conditionnement et l'entreposage de longue durée (axe3).

#### **3 – 1 – Actinides (rappel)**

Les actinides sont des métaux lourds dont le numéro atomique est compris entre 89 (actinium, dont les actinides tirent leur nom) et 103 (lawrencium). Ces 15 éléments possèdent des propriétés chimiques semblables aux lanthanides, au-dessous desquels ils sont situés dans le tableau périodique des éléments. Ces éléments radioactifs peuvent être naturels ou produits artificiellement lors des réactions nucléaires de fission. Tous les isotopes des actinides ont naturellement tendance à être instables et se désintègrent facilement lorsqu'ils sont bombardés par des faisceaux de particules. On distingue les actinides majeurs (uranium, thorium et plutonium), qui sont les plus abondants et les plus stables, des actinides mineurs (principalement le neptunium, américium et curium), issus de la fission. Ces derniers constituent avec le plutonium une grande partie de déchets radioactifs à durée de vie longue. Le neptunium 237, généré par capture de neutrons par l'uranium 235 possède ainsi une période de 2,15 millions d'années mais il est faiblement radioactif. À l'inverse, l'actinide mineur le plus radioactif est le curium 244, qui représente 60 % de la radioactivité des actinides mineurs issus de déchets nucléaires, mais dont la durée de vie est de seulement 18 ans environ. 600 grammes d'actinides mineurs sont générés par tonne de combustible irradié, soit environ une tonne par an à l'échelle du parc nucléaire français. Ils sont généralement vitrifiés avec les autres déchets à haute radioactivité, bien que certains réacteurs à neutrons rapides permettent de les transformer en produits de fission à vie courte.

### 3 – 2 -Transmutation

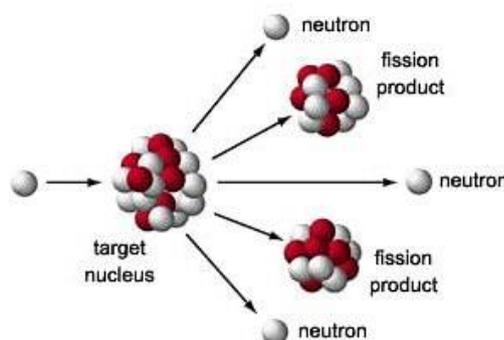
La transmutation nucléaire est la **conversion d'un élément chimique ou d'un isotope en un autre élément chimique**. La transmutation nucléaire se produit dans tout processus où le nombre de protons ou de neutrons dans le noyau d'un atome est modifié. Après séparation, la transmutation vise à transformer les éléments radioactifs à vie longue en éléments à durée de vie plus courte ou stables. Pour y parvenir, le moyen le plus efficace est de bombarder ces éléments à vie longue par des neutrons disponibles en très grande quantité dans les réacteurs nucléaires

#### Comment et avec quels outils réaliser la transmutation ?

Les trois outils étudiés pour réaliser la transmutation sont

- les réacteurs à neutrons thermiques (les réacteurs à eau sous pression actuels d'EDF),
- les réacteurs à neutrons rapides et
- des installations couplant un accélérateur de particules et un réacteur sous-critique à neutrons rapides (appelées « systèmes hybrides » ou « Accelerator Driven System ADS »)

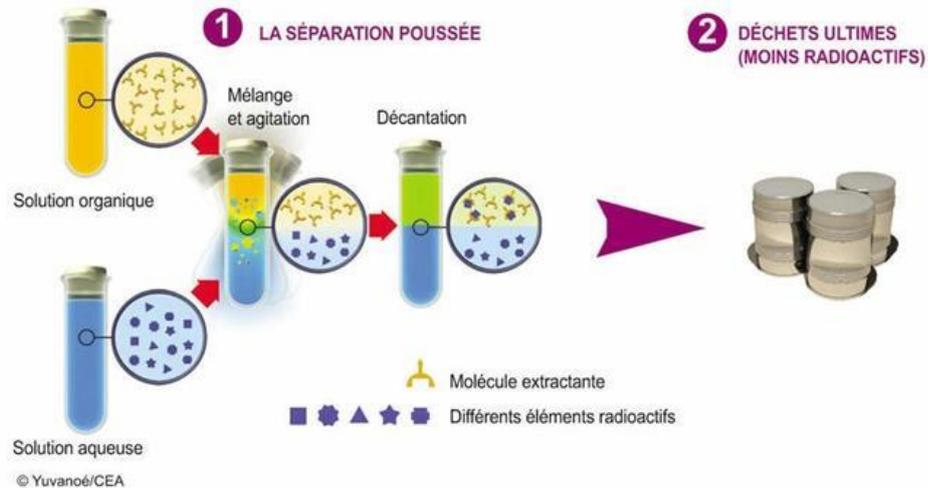
Les travaux menés au CEA ont montré que la transmutation en réacteurs à neutrons thermiques est techniquement peu efficace. Par contre, les caractéristiques des réacteurs à neutrons rapides, du type dPhénix, permettent d'envisager la transmutation des actinides mineurs, en utilisant des combustibles contenant des quantités significatives d'actinides mineurs (2,5 % à 5 %)



### 3-3 Séparation/transmutation

**la séparation/transmutation des actinides mineurs, sous la responsabilité du CEA** : il s'agit d'isoler puis de transformer les éléments les plus radiotoxiques en les « transmutant » en d'autres éléments moins radiotoxiques et à vie plus courte. Ces recherches sont menées par le CEA en lien avec celles menées sur les réacteurs nucléaires à neutrons

rapides de 4<sup>ème</sup> génération. Le CEA a coordonné les travaux de recherche menés par les établissements publics (Andra, CEA, CNRS, Universités) et leurs partenaires industriels (Orano, EDF) afin d'évaluer les perspectives industrielles des technologies étudiées. Un dossier sur le résultat de ces travaux a été remis au gouvernement fin 2012.



### 3 – 4 – L'entreposage

L'entreposage est l'opération consistant à placer des déchets radioactifs, à titre temporaire, dans une installation spécialement aménagée à cet effet, en surface ou à faible profondeur, dans l'attente de les récupérer, en vue de leur traitement ou de leur évacuation vers les filières de gestion dédiées. Il se justifie notamment pour les déchets dont les filières associées sont en cours d'étude. Des entreposages industriels existent d'ores et déjà sur les sites nucléaires.

Ces déchets sont souvent vitrifiés, c'est-à-dire incorporés dans une matrice de verre pour assurer que les noyaux radioactifs resteront capturés et ne migreront pas à échelle de temps géologique. Ils sont d'abord entreposés sur leur lieu de production le temps que leur température diminue.

### 3 – 5 – Stockage en couche géologique profonde

#### 3 – 5 – 1 – Principe

Il consiste à déposer les colis de déchets dans des ouvrages souterrains creusés dans un milieu géologique imperméable présentant des caractéristiques favorables en termes de stabilité géologique, d'hydrogéologie, de géochimie et de comportement mécanique et thermique.

Le milieu doit être choisi de façon à éviter des zones présentant un intérêt exceptionnel en termes de ressources souterraines extractibles et les

ouvrages doivent être implantés à une profondeur minimale d'au moins 200 mètres pour s'affranchir des effets liés à l'érosion et aux intrusions humaines.

Le concept de stockage géologique étudié repose sur le principe de barrières multiples qui s'opposent à l'arrivée de l'eau sur les déchets puis limitent (et permettent de maîtriser) la dispersion des substances radioactives. Ces barrières comprennent le colis de déchets, la « barrière ouvragée », qui est le matériau manufacturé qui peut être interposé entre le colis de déchets et la roche, et la barrière géologique qui est la roche elle-même. Le rôle du milieu géologique hôte consiste tout particulièrement à confiner les substances radioactives relâchées au cours du temps en assurant une migration très lente et en favorisant les phénomènes de rétention dans les terrains traversés, de manière à bénéficier de la décroissance radioactive.

### **3 – 5 – 2 - lieux de stockage : ANDRA – spécialisé , en France, dans le stockage**

L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs est chargée de la gestion à long terme des déchets radioactifs produits en France. Dans le cadre de cette mission, l'Andra met son expertise et son savoir-faire au service de l'État pour : trouver, mettre en œuvre et garantir des solutions de gestion sûres pour l'ensemble des déchets radioactifs français afin de protéger les générations présentes et futures du risque que présentent ces déchets.

En France, le stockage des déchets nucléaires s'effectue dans les centres de stockage des déchets radioactifs définitifs de

- **Aube** (Soulaines et Morvilliers),
- **Gard** (Marcoule)
- **Manche** (cap de la Hague). Il s'agit de zones hautement sécurisées.

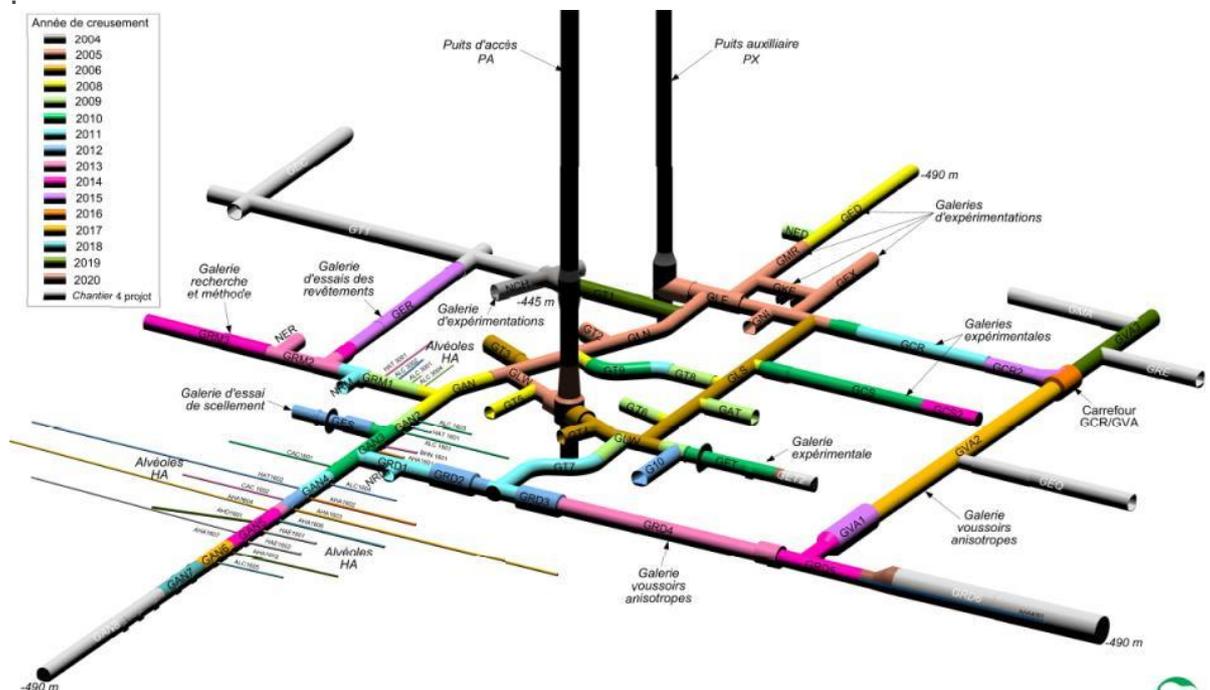
### **3 – 5 -3 – laboratoire souterrain**

Depuis 2000, le Laboratoire souterrain de l'**Andra** situé dans le sud de la Meuse étend progressivement son réseau de galeries à 490 mètres de profondeur. Outil de recherche et d'expérimentation hors du commun, il prépare Cigéo, le projet de stockage géologique profond des déchets français les plus radioactifs. Le site du Laboratoire souterrain se compose :

- **D'installations en surface** (locaux administratifs, ateliers, laboratoires et bâtiment d'accueil du public), sur une superficie d'environ 17 hectares,
- **De deux puits d'accès** de 4 et 5 mètres de diamètre,
- **2 000 mètres de galeries** souterraines exploitées à 445 et 490 mètres de profondeur, implantées directement dans la couche argileuse du Callovo-Oxfordien

Les expérimentations scientifiques, menées en collaboration avec de nombreux partenaires français ([BRGM](#), [CEA](#), [CNRS](#)...) et internationaux (homologues suédois, belges, suisses...) permettent d'étudier au cœur de la roche et en temps réel le milieu

géologique. **L'objectif des expérimentations est, d'une part, d'éprouver la capacité de confinement de la roche argileuse et d'autre part, de compléter les données déjà acquises à partir d'échantillons sur ses caractéristiques mécaniques, thermiques, géochimiques et hydrauliques.** Ainsi les scientifiques étudient les réactions de la roche aux perturbations que provoquera le stockage, notamment sont creusement et son échauffement



### 3 – 5 – 4 – projet Cigéo

Cigéo est le projet français de centre de stockage profond de déchets radioactifs. Il est conçu pour stocker les déchets hautement radioactifs et à durée de vie longue produits par l'ensemble des installations nucléaires actuelles, jusqu'à leur démantèlement, et par le traitement des combustibles usés utilisés dans les centrales nucléaires. Cigéo sera implanté en Meuse / Haute-Marne et sera composé d'une zone souterraine (où seront stockés les déchets) et d'installations de surface réparties sur deux zones, ainsi que de liaisons entre la surface et le souterrain. Les déchets y seront stockés pendant plus de 100 ans et le stockage sera construit de manière progressive au fur et à mesure des besoins puis refermé pour assurer le confinement des déchets sur de très longues périodes de temps sans nécessiter d'actions humaines.

Le projet en quelques chiffres :

- 85 000m<sup>3</sup> de déchets seront stockés pendant les siècles à venir
- 500m de profondeur
- 270 km de galeries
- 15km<sup>2</sup> de superficie

- Une réversibilité du projet pendant 100 ans
- 5 puits verticaux pour les travaux et la maintenance



## 4 – Entreposage à sec

Après avoir été utilisés dans les réacteurs nucléaires, les combustibles irradiés sont stockés quelques années dans des piscines de refroidissement attenantes aux réacteurs. La question d'un stockage plus pérenne se pose ensuite, lorsque leur radioactivité et la chaleur qu'ils dégagent ont suffisamment diminué. Dans la majorité des pays pourvus de centrales nucléaires (États-Unis, Allemagne, Suède, Japon, Corée du Sud...), c'est alors **la solution de l'entreposage à sec** qui a été retenue. La France se distingue par son refus de cette option, au nom de sa doctrine du « retraitement » et au profit de deux projets contestables et contestés : **l'enfouissement** pour les déchets nucléaires hautement radioactifs et à durée de vie longue (projet Cigéo à Bure) et le **stockage en piscine** de très grande capacité pour les combustibles UOX, MOX et URE (projet d'entreposage centralisé de Belleville-sur-Loire).

### 4-1- Introduction

À la fin de leur utilisation dans le réacteur nucléaire (trois ou quatre ans environ), les combustibles irradiés sont entreposés sous eau dans une « **piscine** » située à proximité du réacteur. Ils sont constamment refroidis par circulation de l'eau afin d'évacuer la chaleur produite par la radioactivité des produits de fission et des transuraniens, dont le plutonium, qu'ils contiennent. La solution adoptée dans la majorité des pays pourvus de centrales nucléaires (États-Unis, Allemagne, Suède, Japon, Corée du Sud...) est de garder les combustibles irradiés en l'état, de les entreposer dans les piscines des réacteurs, et, après quelques années, dans des installations **d'entreposage à sec** lorsque leur radioactivité et la chaleur qu'ils dégagent ont suffisamment diminué.

### 4-2- Entreposage à sec

la capacité de la piscine ne peut être augmentée. Les exploitants ont alors commencé à se tourner vers l'entreposage à sec pour gérer leur combustible irradié sur place. Après quelques années dans la piscine, le combustible s'est refroidi et sa radioactivité a diminué suffisamment pour permettre son retrait. Le transport du combustible utilisé dans des conteneurs secs libère de l'espace dans la piscine pour stocker le combustible irradié nouvellement retiré du réacteur.



Les conteneurs à sec sont typiquement constitués d'un cylindre métallique scellé pour contenir le combustible utilisé, enfermé dans une coquille extérieure en métal ou en béton pour fournir une protection contre les rayonnements. Dans certains modèles, les conteneurs sont posés verticalement sur un socle en béton ; dans d'autres, ils sont placés horizontalement.

L'entreposage en conteneur à sec est sans danger pour les personnes et l'environnement. Les systèmes de conteneurs sont conçus pour absorber les rayonnements, gérer la chaleur et prévenir la fission nucléaire. Ils doivent résister aux tremblements de terre, aux projectiles, aux tornades, aux inondations, aux températures extrêmes et à d'autres scénarios. La chaleur générée par un conteneur de combustible utilisé chargé est généralement inférieure à celle générée par un système de chauffage domestique. La chaleur et la radioactivité diminuent avec le temps sans avoir besoin de ventilateurs ou de pompes. Les fûts sont sous surveillance constante.



Le combustible irradié est actuellement entreposé à sec dans 34 États sur plus de 60 sites sous licence générale et 15 sites avec des licences spécifiques. Des informations supplémentaires sont disponibles sur le site Web de la NRC (Nuclear Regulatory Commission)-[www.nrc.gov](http://www.nrc.gov) ».

#### 4-3- Procédé ORANO

**Areva** devient **Orano** pour tourner la page des années Lauvergeon. Le groupe arrive à la fin de sa restructuration. Le spécialiste du nucléaire se concentre sur le cycle du combustible et le démantèlement des réacteurs, et compte renforcer son développement en Asie.

Orano TN fournit des systèmes d'entreposage à sec de qualité supérieure, y compris des conteneurs blindés en acier inoxydable. Nos suremballages en béton sont appelés « Modules de Stockage Horizontaux ». Ils sont fabriqués sur place ou fabriqués par le fabricant américain et expédiés sur le site pour y être installés. Les systèmes d'entreposage à sec contiennent le combustible irradié dans une position horizontale ou verticale. Initialement, les systèmes d'entreposage à sec étaient à la verticale, jusqu'à ce qu'Orano développe une solution moins risquée et innovante : les systèmes horizontaux ne peuvent pas basculer, et la manipulation sur site de ces systèmes lourds est simple et plus sûre en position horizontale.

### 5- Règlementation

#### 5 – 1 – ASN – Autorité de Sécurité Nucléaire

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), Autorité administrative indépendante créée par la loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (dite « loi TSN », désormais codifiée aux livres Ier et V du code de l'environnement par l'ordonnance n° 2012-6 du 5 janvier 2012), est chargée de contrôler les activités nucléaires civiles en France.

Les missions de l'ASN s'articulent autour de trois métiers « historiques » de l'ASN :

- **la réglementation** : l'ASN est chargée de contribuer à l'élaboration de la réglementation, en donnant son avis au Gouvernement sur les projets de décrets et d'arrêtés ministériels ou en prenant des décisions réglementaires à caractère technique ;
- **le contrôle** : l'ASN est chargée de vérifier le respect des règles et des prescriptions auxquelles sont soumises les installations ou activités qu'elle contrôle ;
- **l'information du public** : l'ASN est chargée de participer à l'information du public, y compris en cas de situation d'urgence.

## 5 – 2 – la législation

Trois lois encadrent la gestion des déchets radioactifs en France. La **loi Bataille du 30 décembre 1991** a été le point de départ de programmes de recherche pour améliorer la gestion des déchets radioactifs. Celle-ci a été modifiée par **la loi du 28 juin 2006** sur la gestion durable des déchets radioactifs, puis par la **loi du 25 juillet 2016** sur le projet Cigéo d'enfouissement des déchets nucléaires.

Ces lois ont fixé trois axes de recherches menées par l'Andra et le CEA :

- **le conditionnement-entreposage pour les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL)** encore en attente de solutions de gestion définitive. L'Andra travaille sur un projet d'entreposage à faible profondeur. Il s'agit cependant d'une solution à court terme, puisque ce type de filière ne peut garantir un confinement sûr et une surveillance active des déchets pendant plusieurs centaines de milliers d'années ;
- **la séparation-transmutation pour les déchets de haute activité (HA)**. Ces recherches, menées par le CEA, visent à isoler les atomes très radioactifs à vie longue pour les transformer en d'autres atomes dont la période radioactive serait plus courte. Cette solution intéressante est néanmoins coûteuse et rencontre encore des obstacles techniques. Par ailleurs, elle générerait la production d'autres déchets radioactifs ;
- **le stockage en couche géologique pour les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (MA-VL)**. Appelé Centre industriel de stockage géologique (Cigéo), ce projet consiste à enfouir les déchets les plus dangereux dans des galeries creusées à 500 mètres de profondeur dans une couche d'argile stable et imperméable. La loi de 2006 a retenu le projet Cigéo comme **une solution durable à long terme**. Les déchets HA et MA-VL restant encore actifs pendant plusieurs centaines de milliers d'années, ce

site d'enfouissement doit permettre un stockage longue durée sans qu'une intervention humaine ne soit nécessaire.

•

### 5 -3 – PNGMDR

Les matières et les déchets radioactifs doivent être gérés de façon durable, dans le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement. Le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) constitue un outil de pilotage privilégié pour mettre en œuvre ces principes dans la durée, selon les dispositions des articles L. 542-1 et suivants du code de l'environnement et de la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs. Ce plan, mis à jour tous les trois ans, dresse le bilan de la politique de gestion des substances radioactives sur le territoire national, recense les besoins nouveaux et détermine les objectifs à atteindre, notamment en termes d'études et de recherches pour l'élaboration de nouvelles filières de gestion. Le PNGMDR a une vocation d'exhaustivité : il concerne à la fois les déchets ultimes et les matières radioactives valorisables, à la fois les filières de gestion existantes et celles en projet, en développement ou à définir ; il concerne également toutes les catégories de déchets radioactifs quelle que soit leur origine

Les prescriptions du PNGMDR sont reprises dans un décret et un arrêté qui inscrivent dans la réglementation les orientations données par le groupe de travail. À l'issue de la consultation du public, le PNGMDR finalisé sera transmis au Parlement, qui le soumettra pour évaluation à l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), conformément à l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement.

#### **Études établies au titre du PNGMDR 2021-2025.**

La gestion des déchets HA et MA-VL

- État des lieux des déchets MA-VL produits avant 2015 et calendrier de conditionnement associé (Orano)
- État des lieux des déchets MA-VL produits avant 2015 et calendrier de conditionnement associé (CEA)

### 5 -4 – IRSN-Institut de Radioprotection et de sécurité nucléaire - [www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)

**L'IRSN est l'expert public en matière de recherche et d'expertise sur les risques nucléaires et radiologiques.**

L'IRSN est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) dont les missions sont définies par la loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative

à la transition énergétique pour une croissance verte et dont l'organisation et la gouvernance sont précisées dans le décret n°2016-283 du 10 mars 2016.

L'IRSN est placé sous la tutelle conjointe du ministre de la Transition écologique, du ministre des Armées, et des ministres chargés de la Transition énergétique, de la Recherche et de la Santé.

L'IRSN mène depuis 1989 des recherches dans sa **station expérimentale de Tournemire**, dans le sud de l'Aveyron. Ce laboratoire souterrain aménagé dans un ancien tunnel ferroviaire est un outil **pour étudier les performances de certains composants d'un stockage ainsi que les propriétés de confinement de la roche argileuse**, dans un environnement comparable mais aussi plus extrêmes que celui du site du projet Cigéo.

Tournemire n'est en aucun cas destiné à accueillir un jour des déchets radioactifs. De plus, aucun composant radioactif n'y est introduit au titre des recherches.

## 6 – Recherche et innovation

### 6 – 1 – Appel à proposition- Bpifrance

**Appel à projets solutions innovantes pour la gestion des matières et déchets radioactifs et la recherche d'alternatives au stockage géologique profond.** Le plan France relance prévoit un soutien au secteur nucléaire visant à favoriser l'innovation au sein de la filière, notamment en matière de gestion des déchets radioactifs.

Cet appel à projets s'adresse à des projets de R&D à visée industrielle ainsi qu'à des projets de recherche plus fondamentaux proposant des solutions très innovantes, en rupture avec les voies traditionnellement explorées.

Les projets doivent s'inscrire dans une des trois thématiques suivantes :

- **Thématique 1** : Optimisation de la gestion des déchets et meilleure structuration des filières de gestion
- **Thématique 2** : Valorisation des matières radioactives
- **Thématique 3** : Solutions alternatives au stockage géologique profond
- 

### 6 -2 – Projet européen PREDIS ‘ [www.predis'h2929.eu](http://www.predis'h2929.eu)

Le projet **PREDIS** est le résultat de l'appel d'AIR EURATOM NFRP-2019-2020-10 « Développer des activités de pré-stockage identifiées dans le cadre du programme conjoint européen de gestion des déchets radioactifs » (septembre 2019).

Le projet **PREDIS** a débuté le 1.9.2020 avec une durée de quatre ans. Le consortium comprend 47 partenaires de 18 États membres. Le budget global du projet est de 23,7 M€, avec une contribution de la CE de 14 M€.

Le projet **PREDIS** développe et augmente le niveau de maturité technologique des méthodologies de traitement et de conditionnement des déchets pour

lesquels aucune solution adéquate ou mature industriellement n'est actuellement disponible, y compris les matériaux métalliques, les déchets organiques liquides et les déchets organiques solides. **Le projet PREDIS** développe également des innovations dans la manutention des déchets cimentés et le stockage préalable à l'élimination par des tests et des évaluations.

**Les objectifs de haut niveau de PREDIS sont les suivants :**

- Développer des solutions (méthodes, procédés, technologies et démonstrateurs) pour le traitement et le conditionnement futurs des déchets dans un certain nombre d'États membres pour lesquels aucune solution industrielle mature ou inadéquate n'est actuellement disponible, améliorant ainsi la sécurité lors des prochaines étapes de la gestion des déchets;
- ou améliorer les solutions existantes au moyen de procédés alternatifs plus sûrs, moins coûteux ou plus efficaces lorsqu'ils apportent des avantages mesurables à plusieurs États membres (États membres).
- Analyser les critères, les paramètres et les spécifications des matériaux et des emballages avec les critères d'acceptation des déchets (WAC) associés pour les activités de pré-élimination et d'élimination, en soutenant l'homogénéisation des processus de gestion des déchets dans toute l'Europe.

**6 – 3 -Dexter, un système de télémanipulation à distance développé par Veolia Nuclear Solutions**

Prenant la forme d'un bras articulé imitant celui d'un humain, Dexter est un robot agile et sensible, capable d'identifier les différentes textures et matières, utilisé pour manipuler des déchets radioactifs dans des zones inaccessibles pour l'homme. Il est piloté à distance par un opérateur humain, dont il réplique les mouvements, grâce à une liaison internet sécurisée, et peut manier des objets de 10 kg (pour un bras) à 100 kg (deux bras avec une fixation grue), mais aussi attraper de petits objets comme un crayon.

**6 – 4- La technologie plasma de Belgoprocess**

Dans **un four à plasma**, les déchets radioactifs ne sont plus incinérés de façon conventionnelle, mais fondus au moyen d'une torche plasma atteignant les 5000°C. Ni le béton, ni l'acier y résistent... La technologie plasma offre un facteur de réduction de volume de déchets très élevé. On peut ainsi **réduire les déchets** entièrement combustibles **de 80m3 à 1 m3**. C'est une avancée importante pour le traitement des déchets qui soutient l'aspect durable de l'énergie nucléaire bas-carbone.



## Annexe1 : durée de vie des radionucléides

Radionucléide	Période
Cobalt 60	5,2 ans
Tritium	12,2 ans
Strontium	90 28,1 ans
Césium	137 30 ans
Américium	241 432 ans
Radium	226 1 600 ans
Carbone	14 5 730 ans
<b>Plutonium</b>	<b>239 24 110 ans</b>
Neptunium	237 2 140 000 ans
Iode129	15 700 000 ans
Uranium238	4 470 000 000 ans

## Annexe 2 : documentations complémentaires :

- ✓ ASN -Autorité de sécurité nucléaire – [www.asn.fr](http://www.asn.fr)
- ✓ **Global Chance** – une expertise independante sur la transition énergétique depuis1992 – [www.global-chance.org](http://www.global-chance.org)
  - Etat des lieux des projets d'enfouissement des déchets radioactifs Etude par pays- 22 septembre 2022 - 94 pages
  - Les déchets des clients étrangers des usines de la Hague- 28 décembre 2021-jean-claude Zerbib- 13 pages
  - Risques d'exploitation du centre de stockage Géologique (CIGEO)- 29 octobre 2021– Bernard Thuillier- 18 pages
- ✓ Encyclopédie de l'Energie – [www.encyclopedie-energie.org](http://www.encyclopedie-energie.org)
  - Le stockage des déchets nucléaire
  - Les déchets nucléaires sont-ils gérables ?
  - Le stockage des déchets nucléaires en site profond
- ✓ ANDRA – Agence National pour la gestion des Dechets Radio Actifs – [www.andra.fr](http://www.andra.fr)
- ✓ **CIGEO** -centre industriel de Stockage Géologique – [www.cigeo.gouv.fr](http://www.cigeo.gouv.fr)
- ✓ **Andra** : rapport d'activité Scientifiques et Techniques : voir « dossier 2020 »