

Chap 5 : RADIOCHIMIE ET ENERGIE NUCLEAIRE

Le traitement des déchets radioactifs : Les procédés actuel (PUREX)

Historique

- 1938 Otto Hahn : première fission
- 1942 Enrico Fermi : premier réacteur à fission
- 1951 production d'énergie contrôlée
- 1961 premières centrales nucléaires civiles

Définition des déchets nucléaires :

Un déchet radioactif est toute matière solide, liquide ou gazeuse qui contient une substance nucléaire radioactive et qui n'a aucune utilisation prévisible. Les déchets radioactifs se sont les déchets produits par les activités nucléaires, quelles qu'elles soient : production d'électricité, recherche, médecine ou industrie.

il existe 4 catégories de déchets radioactifs. Les catégories de déchets radioactifs sont structurées en fonction du confinement et de l'isolement requis pour en assurer la sûreté à court et à long terme, et elles prennent aussi en compte le risque pour la santé et la sécurité des humains et de l'environnement.

Exemple : L'Uranium est constitué de 2 isotopes, U238 et U235 (<1%), dont seul U235 se prête à la fission 22,5 GWh?1 kg d'U235

Eau : modérateur et moyen de refroidissement

Problème abordé ici : que faire avec les déchets? Total des déchets produits dans le monde est estimé à **10 000 tonnes par an.**

Centrales nucléaires dans le monde :

Il y'a 438 centrales dans 32 pays couvrant 17% des besoins mondiaux en électricité

USA : 104 centrales

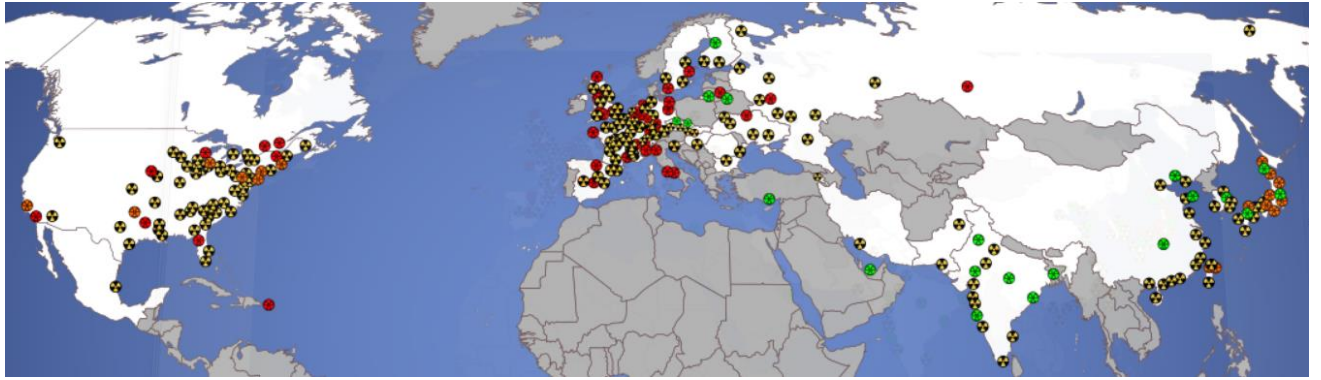
France : 58 centrales

Russie : 37 centrales

Chine : 55 centrales

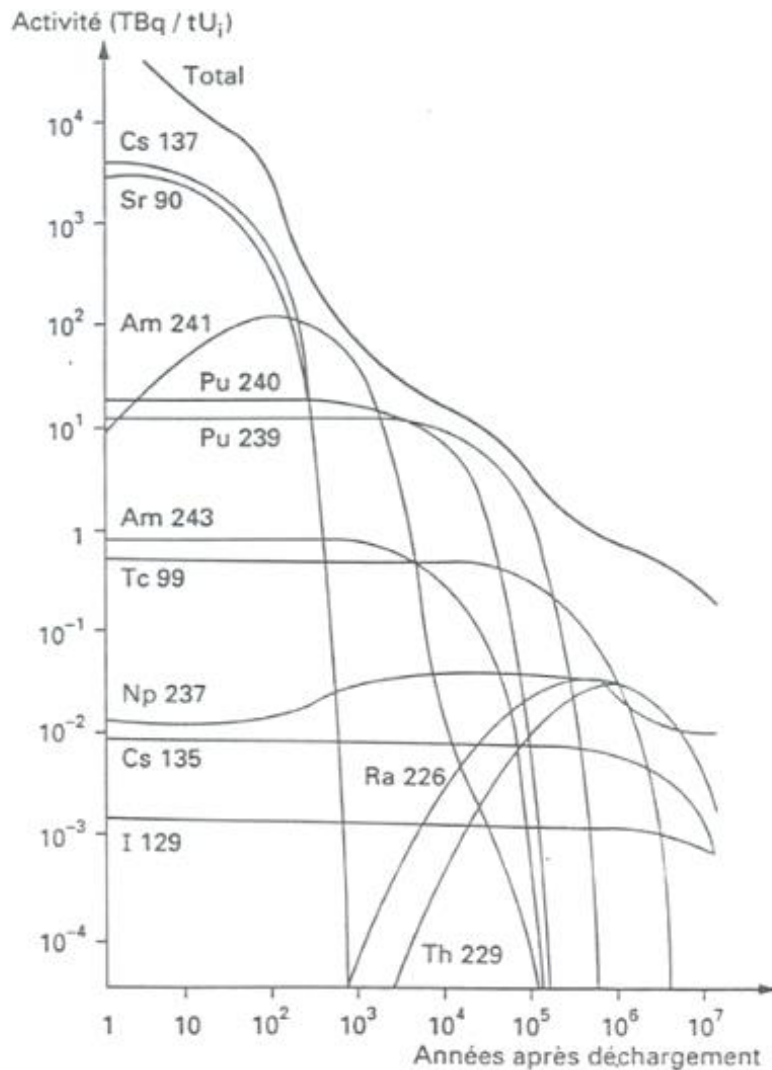
Japon : 33 centrales

Inde : 22 centrales



Remarques : on doit savoir que :

- Une centrale produit 8760 GWh d'électricité chaque année.
- 1 Kg d'uranium 235 produit 22,5 GWh d'électricité,
- Pour produire la même capacité en énergie il faut 55 km² de panneaux solaires, si on prend des panneaux de (1,7 m²), il faudrait 32 millions de panneaux solaires
- Aussi, il faut 2400 éoliennes pour produire la même capacité en énergie électrique.



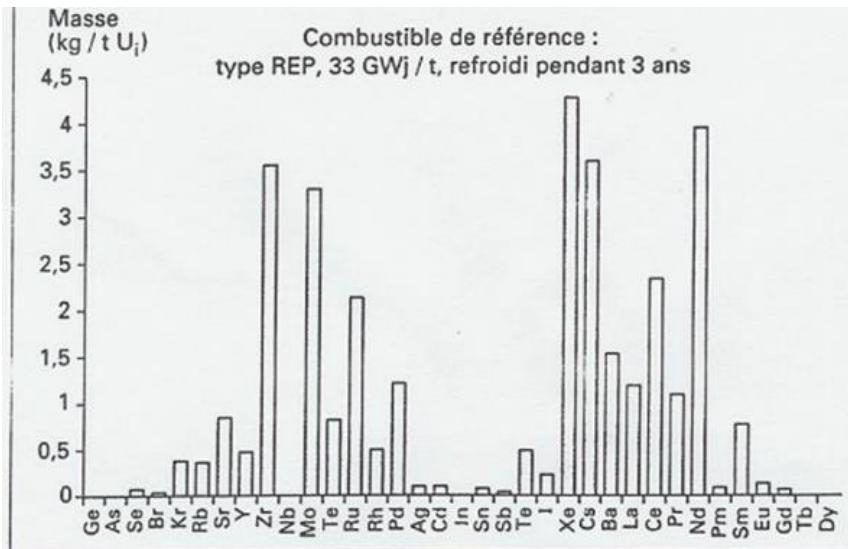
Décroissance de quelques éléments radioactifs

Dans un combustible utilisé on trouve presque :

- 4% de produits de fission à haute activité => déchets ultimes
- 95% uranium 238 => déchets recyclé
- 1% plutonium => déchets recyclé

Buts du retraitement :

- Récupérer les matières énergétiques
- Conditionner les déchets radioactifs pour leur stockage définitif
- Réduction significative de la teneur en éléments à longue vie
- Réduction significative (80%) de leur volume total



Types des déchets nucléaires :

Les déchets nucléaires sont classés en différentes catégories en fonction de leur niveau de radioactivité, de leur origine et de leur durée de vie. Voici les principales catégories de déchets nucléaires :

1) Déchets de faible activité (FA) :

Ce sont des déchets contenant des niveaux relativement faibles de radioactivité. Exemples : vêtements de protection usagés, outils, résines échangeuses d'ions, etc. La plupart des déchets de faible activité peuvent être traités et éliminés de manière conventionnelle.

2) Déchets de moyenne activité (MA) :

Ils contiennent des niveaux plus élevés de radioactivité que les déchets de faible activité. Exemples : déchets issus du retraitement du combustible nucléaire usé, certaines pièces de réacteurs, etc. Le stockage à long terme ou la vitrification sont souvent utilisés pour gérer ces déchets.

3) Déchets de haute activité (HA) :

Ce sont les déchets les plus radioactifs et dangereux. Principalement issus du retraitement du combustible nucléaire usé et de la production d'énergie nucléaire. Souvent vitrifiés (incorporés dans du verre) ou stockés dans des conditions très contrôlées, parfois dans des dépôts géologiques profonds.

4) Déchets de très haute activité (THA) :

Certains considèrent les déchets de haute activité comme une catégorie distincte appelée "déchets de très haute activité".

Il s'agit généralement des déchets les plus dangereux et les plus radioactifs, principalement issus du retraitement du combustible nucléaire.

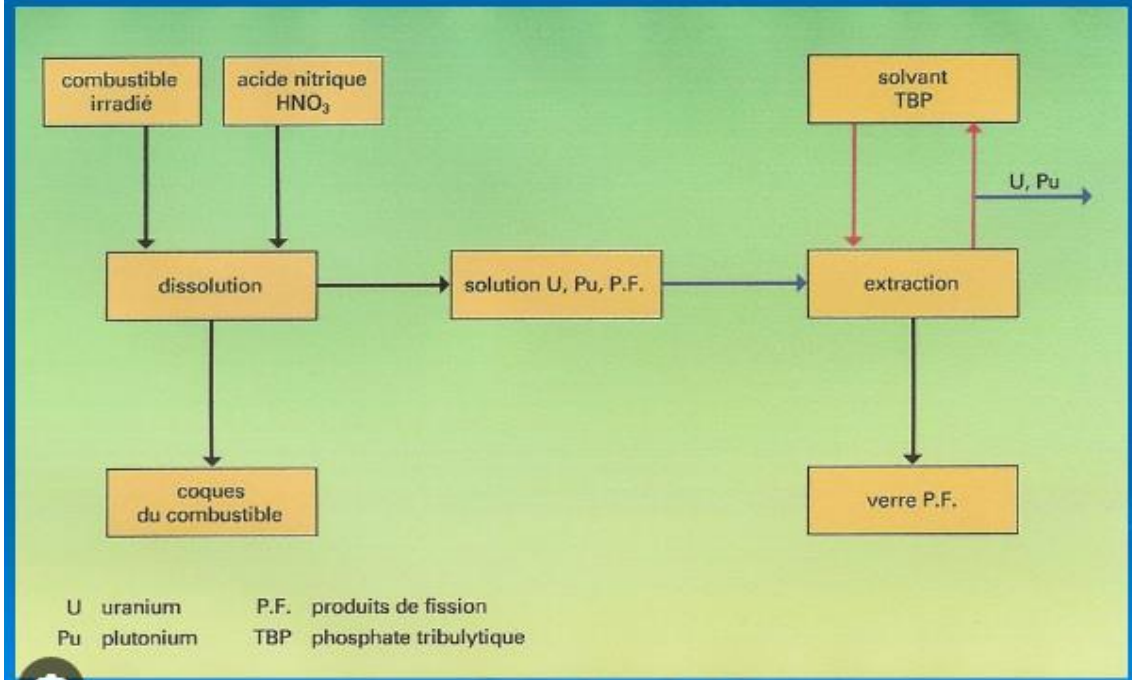
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------------------|--|---|--|---|
| | Déchets des mines et des usines de concentration d'uranium | Déchets de faible activité | Déchets de moyenne activité | Déchets de haute activité |
| | Incluent les résidus et les stériles produits par l'extraction et la concentration du minerai d'uranium. | La radioactivité dépasse les niveaux de libération et les quantités d'exemption. | Contiennent suffisamment de radionucléides à période longue pour devoir être isolés ou confinés. | Combustible nucléaire utilisé et faibles quantités de déchets qui génèrent une chaleur importante et du rayonnement. |
| D'où viennent-ils? | Résultat de l'extraction ou de la concentration du minerai d'uranium en yellowcake | Centrales nucléaires, réacteurs de recherche, installations d'essais, production et utilisation de radio-isotopes, raffinage et conversion de l'uranium, fabrication de combustible nucléaire | Centrales nucléaires, prototypes de réacteurs, réacteurs de recherche, installations d'essais, production et utilisation de radio-isotopes | Centrales nucléaires, prototypes de réacteurs et réacteurs de recherche, installations d'essais |
| En quoi consistent-ils? | Les résidus ont la consistance du sable fin; les stériles ont l'apparence de gravier ou de roche fragmentée. | Équipement utilisé, papier, câbles, vêtements, pièces déclassées et même des vadrouilles | Pièces de réacteur utilisées ou déclassées, résines d'échangeurs d'ions et certaines sources radioactives utilisées en radiothérapie | Combustible nucléaire utilisé qui demeure encore fortement radioactif |
| Où se trouvent-ils? | Les résidus sont stockés dans des installations de confinement ou remis dans le puits désaffecté; les stériles sont placés en tas, à la surface. | Ils sont habituellement stockés en surface dans des conteneurs et des sacs placés dans des installations autorisées. | Ils sont actuellement stockés dans des silos blindés en surface ou souterrains sur le site d'installations de déchets autorisées. | Le combustible utilisé est stocké sur le site du réacteur dans une piscine de désactivation étanche renforcée pendant une période de 7 à 10 ans, puis il est transféré dans des conteneurs ou des silos de stockage à sec en béton. |

Procédé PUREX

Le procédé chimique PUREX (acronyme de l'anglais Plutonium, Uranium, Reduction, EXtraction) est une méthode de traitement du combustible nucléaire utilisé, utilisée depuis 1947.

Étapes du procédé PUREX

I- Schéma du procédé Purex



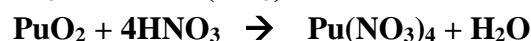
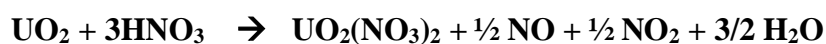
Le procédé PUREX comporte plusieurs étapes, dont voici une description simplifiée :

- Elimination des gaines (par cisailage - dissolution par exemple) ;
- Dissolution du combustible irradié dans l'acide nitrique ;
- Récupération des solides insolubles par centrifugation;
- Envoi des morceaux de gaines (coques et embouts) non attaqués aux déchets pour compactage,

PUREX est alors mis en œuvre:

- Extraction de l'uranium et du plutonium par un solvant organique de 30 % de tributylphosphate (TBP) dans du dodécane ;
- Récupération des produits de fission et actinides (sauf uranium et plutonium) dans la phase acide nitrique ;
- Extraction du plutonium de la solution uranium/plutonium par réduction du plutonium ;
- Epuration, concentration et transformation chimique de l'uranium et du plutonium.

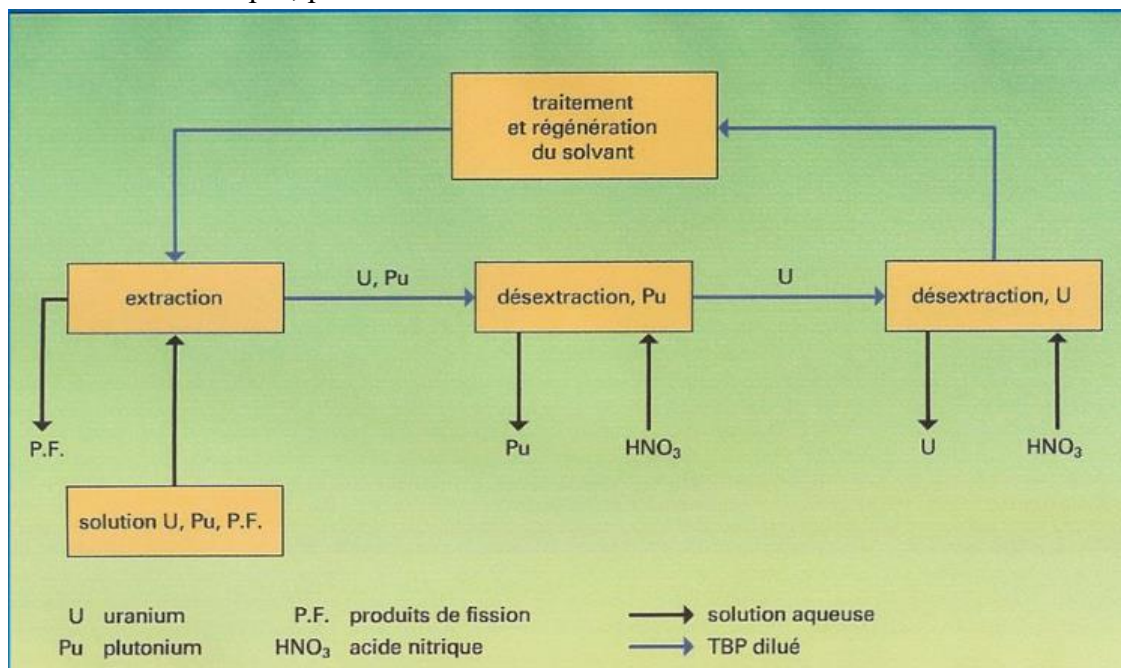
1. Dissolution : Les combustibles nucléaires usés, généralement sous forme de dioxyde d'uranium, sont dissous dans de l'acide nitrique, formant une solution qui contient le plutonium, l'uranium et d'autres produits de fission.



2. Extraction : Cette solution est ensuite traitée avec un solvant organique spécifique qui extrait sélectivement le plutonium et l'uranium de la solution, formant une phase organique riche en ces éléments.

Extraction par un solvant

- Transfert de matière entre 2 liquides non miscibles
- Solution aqueuse (phase aqueuse)
- Un liquide organique (le solvant) ? U et Pu dans le solvant
- Emulsion
- Après transfert, phases séparées par décantation et centrifugation
- Succession d'étapes, phases à contre-courant



3. Scission (diluant) : La phase organique est ensuite traitée pour séparer le plutonium de l'uranium. Cela peut être fait par des méthodes chimiques ou par irradiation neutronique pour induire la fission du plutonium.

Le diluant

- Facilite la séparation des phases après émulsion
- Permet de limiter les pertes en TBP (solubilité dans phase aqueuse)
- Limite la concentration en matières nucléaires dans la phase organique

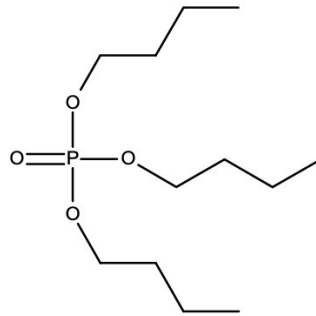
Extractant :

le phosphate tributylrique (TBP)

- Bonne résistance à l'hydrolyse en milieu nitrique
- Résistance à la radiolyse (sous action des rayonnements)



- Opérations de séparation fondées sur les différences de stabilité de ces complexes
- Espèces métalliques de degré d'oxydation IV et VI plus fortement complexées par le TBP que celles de degré I, II, III, V ? Plus extractibles



Phosphate de tributyle (TBP)

4. Recovery (Purification) : Le plutonium et l'uranium extraits peuvent être purifiés et utilisés comme combustible nucléaire pour la production d'énergie.

Purification du plutonium

- Pu obtenu à l'état d'oxydation III
- Subi plusieurs étapes de décontamination par des $\text{NO}_x \rightarrow \text{PuO}_2$ (état d'oxydation IV)

Purification de l'uranium

- U subit 2 cycles d'extraction supplémentaires :
- nitrate d'uranyle $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ contenant moins de 2% en U235
- Les solvants utilisés dans tout le procédé doivent également être recyclés.

Avantage et inconvénient :

Il est important de noter que l'évaluation des avantages et des inconvénients du procédé PUREX dépend largement du contexte politique, économique, environnemental et technologique spécifique à chaque pays. Certains pays ont choisi de développer des programmes de retraitement, tandis que d'autres privilégient des solutions de stockage direct des déchets nucléaires. Les débats sur la gestion des déchets nucléaires et les choix énergétiques sont complexes et souvent liés à des considérations nationales et internationales

Avantages

1. **Récupération des ressources :** Le procédé PUREX permet de récupérer des matériaux fissiles, tels que le plutonium et l'uranium, à partir des déchets nucléaires. Ces matériaux peuvent être réutilisés comme combustible nucléaire, contribuant ainsi à l'utilisation plus efficace des ressources.
2. **Réduction du volume des déchets :** En extrayant les matériaux fissiles des déchets nucléaires, le procédé PUREX peut potentiellement réduire le volume des déchets à stocker de

manière permanente, ce qui peut être avantageux en termes d'espace nécessaire pour le stockage géologique.

3. **Optimisation de la ressource énergétique** : La récupération du plutonium et de l'uranium peut contribuer à optimiser l'utilisation des ressources énergétiques, en prolongeant la durée de vie des combustibles nucléaires et en réduisant la dépendance à l'égard des ressources naturelles.

4. **Réduction des besoins en matières premières** : En recyclant le plutonium et l'uranium, le procédé PUREX peut réduire les besoins en matières premières pour la production de combustible nucléaire, ce qui peut être important compte tenu de la rareté de certaines ressources.

5. **Réduction des émissions de gaz à effet de serre** : L'énergie nucléaire, lorsqu'elle est produite de manière sûre, peut contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux sources d'énergie fossile, contribuant ainsi à atténuer le changement climatique.

Inconvénients

Le procédé PUREX, bien qu'efficace pour récupérer des matériaux fissiles à partir des déchets nucléaires, présente plusieurs inconvénients et préoccupations, notamment :

1. **Prolifération nucléaire** : L'un des principaux inconvénients du procédé PUREX est qu'il peut contribuer au risque de prolifération nucléaire. Le plutonium séparé par ce processus peut être utilisé pour fabriquer des armes nucléaires. Pour cette raison, certains pays ont choisi de ne pas utiliser le retraitement des combustibles nucléaires, préférant le stockage direct des déchets.

2. **Complexité et coûts** : Le procédé PUREX est techniquement complexe et coûteux à mettre en œuvre. La manipulation de matières radioactives, les exigences de sécurité élevées et la nécessité d'installations spécialisées contribuent aux coûts élevés associés au retraitement.

3. **Gestion des déchets** : Bien que le procédé PUREX récupère certains matériaux fissiles, il génère également des déchets radioactifs et chimiques qui nécessitent une gestion appropriée. Le stockage et l'élimination des déchets issus du retraitement restent des défis importants.

4. **Risques environnementaux** : Les procédés chimiques utilisés dans le retraitement, y compris l'utilisation d'acides forts, peuvent poser des risques environnementaux s'ils ne sont pas gérés correctement. Les fuites ou les accidents peuvent entraîner des contaminations radioactives.

5. **Economie de marché** : Avec l'évolution des technologies et le coût croissant des énergies renouvelables, certaines parties du monde ont remis en question la viabilité économique du retraitement des combustibles nucléaires par rapport à d'autres options, telles que le stockage géologique direct.

Traitement des déchets

Le traitement des déchets nucléaires hautement radioactifs implique plusieurs étapes, notamment le prétraitement, le traitement proprement dit et le conditionnement. Voici un aperçu des procédés de traitement et de conditionnement des déchets radioactifs :

1. **Compactage:** Ce procédé consiste à réduire le volume des déchets en les compressant. Il est utilisé pour les déchets non très radioactifs.
2. **Évaporation:** L'évaporation est un procédé utilisé pour éliminer les constituants volatils des déchets. Il est principalement utilisé pour les déchets radioactifs légèrement contaminés.
3. **Incinération:** L'incinération est un procédé qui consiste à dégrader les déchets par chaleur, généralement à l'intérieur d'un four à induction. Ce procédé est utilisé pour les déchets radioactifs organiques.
4. **Fusion:** La fusion est un procédé qui consiste à fondre les déchets à l'aide de la chaleur, généralement dans un four à induction. Ce procédé est utilisé pour les déchets radioactifs inorganiques.
5. **Vitrification:** La vitrification est un procédé qui consiste à encapsuler les résidus ultimes dans un matériau vitreux, comme le verre. Ce procédé est utilisé pour les déchets radioactifs très hautement contaminés, car il permet d'emprisonner les déchets dans un matériau sûr dont la longévité est supérieure à la durée de nocivité de la radioactivité incorporée.



6. **Enrobage par des résines polymères:** Ce procédé consiste à enrober les déchets de résines polymères pour les isoler des radionucléides. Il est utilisé pour les déchets radioactifs légèrement contaminés.
7. **Conditionnement:** Le conditionnement consiste à immobiliser les déchets dans un emballage approprié en vue de leur entreposage ou stockage définitif. Les emballages peuvent être de différents types, tels que les fûts, caissons métalliques, conteneurs en béton ou conteneurs en acier inoxydable.

Stockage des déchets à long terme (comportement des radioéléments dans l'environnement)

Le stockage à long terme des déchets nucléaires implique généralement le stockage en profondeur, car il est considéré comme la solution la plus sûre pour les déchets hautement radioactifs et/ou à longue durée de vie. En Belgique, par exemple, l'Agence fédérale de Contrôle nucléaire (AFCN) a rendu un avis favorable sur le stockage géologique en galeries ou forages profonds comme l'option de gestion à long terme la plus sûre pour les déchets radioactifs de haute activité et/ou de longue durée

. En France, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) a développé le projet Cigéo, qui prévoit le stockage réversible des déchets à 500 mètres de profondeur dans une couche d'argile, avec une surveillance post-fermeture pendant plusieurs centaines d'années

. Ces approches visent à protéger l'homme et l'environnement sur le très long terme. Il est également souligné que le stockage en profondeur est conçu pour être réversible et que les prochaines générations pourront participer aux décisions concernant le devenir de ces installations

. En outre, le stockage en profondeur est considéré comme une solution de référence pour la gestion des déchets à vie longue, et des recherches sont menées sur le principe d'un stockage réversible en couche géologique profonde

. Ces approches visent à assurer la protection de l'homme et de l'environnement sur le très long terme, en minimisant l'impact des radioéléments dans l'environnement.

