



DUPOUY Arnaud

LACOTTE Florentine

POUQUET Camille

TRIOLET Maxime

LICENCE PROFESSIONNELLE

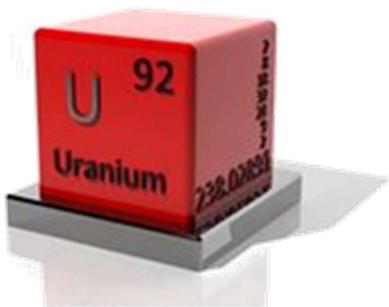
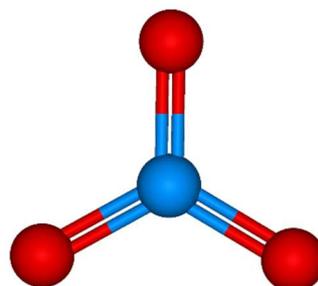
Mention « **Chimie Analytique, Contrôle,
Qualité, Environnement** »

Spécialité « **Métrieologie Chimique et
Nucléaire** »

Année Universitaire 2018-2019

Projet Tuteuré :

L'uranium dans l'industrie nucléaire : de son extraction à son recyclage



Tutrice : LE GUENNEC Mireille, Maître de Conférences



Table des matières

| | |
|---|-----------|
| I. Introduction | 2 |
| II. Extraction de l'uranium | 3 |
| III. Transformation de l'uranium | 5 |
| a. Du minerai au «Yellow Cake»..... | 5 |
| b. Enrichissement de l'uranium..... | 7 |
| c. Fabrication du combustible..... | 9 |
| IV. Utilisation de l'uranium dans les centrales nucléaires | 10 |
| a. Fonctionnement d'une centrale nucléaire..... | 10 |
| b. Utilisation de l'uranium dans un réacteur nucléaire..... | 10 |
| c. Le combustible en fin de vie..... | 14 |
| V. Recyclage des déchets d'uranium | 15 |
| VI. Conclusion | 19 |
| VII. Bibliographie | 20 |

I. Introduction ^[1-3]

L'uranium a été découvert par Klaproth en 1789 alors qu'il menait des expériences sur la pechblende. Le métal a été isolé pour la première fois en 1841. Klaproth baptisa l'élément qu'il venait de découvrir «Uranium» en hommage à la planète Uranus, qui avait été découverte quelques années plus tôt. Elle-même tient son nom d'Ouranos, le dieu du ciel chez les Grecs.

Il est omniprésent dans la nature, en quantités variables mais faibles dans les roches, le sol, l'eau, l'air, les plantes, les animaux et les êtres humains. Il y a en moyenne dans l'organisme humain environ 90 µg d'uranium qui proviennent de l'air, de l'eau et des aliments absorbés. Environ 66 % se trouvent dans le squelette, 16 % dans le foie, 8 % dans les reins et 10 % dans les autres tissus.

Aujourd'hui, l'uranium est le combustible le plus utilisé dans les réacteurs nucléaires. C'est un actinide radioactif (de symbole chimique U et de numéro atomique 92) qui peut être utilisé comme source abondante d'énergie concentrée. Sa densité est de 19,1, sa température de fusion de 1135 °C et sa température d'ébullition de 4131 °C.

Une fois purifié, l'uranium est un métal d'aspect blanc argenté, brillant, assez dense. Il est plus dur que la plupart des autres éléments. Malléable, ductile et légèrement paramagnétique, l'uranium est aussi très électropositif ($\chi = 1,7$ dans l'échelle de Pauling). C'est en revanche un mauvais conducteur électrique. L'uranium réagit avec la quasi-totalité des éléments non métalliques.

L'uranium possède 26 isotopes, tous radioactifs mais dont seulement trois existent à l'état naturel : ^{238}U (99,27 %), ^{235}U (0,72 %) et ^{234}U (0,01 %). La plupart des réacteurs fonctionnent à l'uranium enrichi en ^{235}U (de 1,5 à 3 % environ).

L'uranium est utilisé dans les centrales nucléaires comme source d'alimentation. Pour cela, plusieurs étapes sont nécessaires : l'extraction de l'uranium du minerai puis sa transformation avant utilisation. Le recyclage des déchets d'uranium sera également abordé.

II. Extraction de l'uranium

L'uranium servant de combustible dans les centrales nucléaires est un minerai extrait de la roche, dans des mines. A la naissance des traitements en centrale nucléaire, la plupart des mines d'uranium étaient situées en France. Il y avait un manque de rentabilité lié à l'état pauvre de l'uranium. Pour cela, les industries ont cherché à convoiter des mines dans d'autres pays à partir de la Seconde Guerre Mondiale. C'est en 2001 que la dernière mine française a cessé d'être exploitée.

Actuellement, une dizaine de pays fournissent le minerai d'uranium utilisé dans les centrales nucléaires. L'Australie dispose de 31 % des réserves d'uranium naturel, le Kazakhstan (12 %), le Canada (9 %), la Russie (9 %), le Niger (8 %), l'Afrique du sud, le Brésil et la Namibie (5 % chacun), (figure 1).

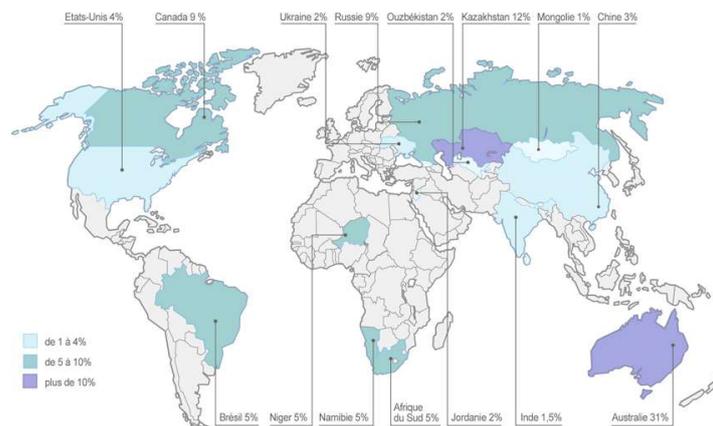


Figure 1^[4] : Carte mondiale des réserves (> 5%) d'uranium naturel

Afin d'extraire le minerai contenant l'uranium, les industries utilisent trois techniques d'extraction ^[5,6] :

1- L'extraction de mine à ciel ouvert : Il s'agit d'une mine dont l'ensemble des matériaux recouvrant le gisement recherché est extrait. Cette technique s'applique pour les gisements peu profonds (profondeur inférieure à 100-150m).



Figure 2 : Mine à ciel ouvert à l'installation de McClean Lake. Source : CNSC.

Le principe est de retirer la partie de la roche non minéralisée afin d'atteindre le minerai exploitable. C'est à ce niveau que la concentration d'uranium est la plus élevée. Il est placé des explosifs, généralement sous forme de solutions pompables, dans des trous forés verticalement,

afin de permettre d'abattre la tranche minière. Le minerai est ramassé par des pelles mécaniques et des chargeuses, et il sera ensuite transporté jusqu'à l'usine.

2- Les mines souterraines : c'est une méthode plus économique que l'exploitation à ciel ouvert. La première étape ici consiste à assurer l'accès au minerai. Pour cela il est creusé des puits verticaux jusqu'à la profondeur voulue. Il y est ensuite percé plusieurs tunnels horizontaux autour du gisement, donnant accès directement au minerai, tout en permettant l'aménagement de circuits de ventilation. Dans la plupart des mines souterraines, le minerai y est dynamité et acheminé à la surface pour y être concentré.



Figure 3 : Chevalement principal de la mine de McArthur River qui couvre le treuil au-dessus du puits vertical. Source : CNSC.

3- La récupération in situ : Cette technique d'extraction est actuellement utilisée dans plus de la moitié des mines du monde. Elle consiste à injecter lentement une solution (généralement une solution d'acide sulfurique) à travers un minerai par le biais d'un premier forage. L'uranium sera donc dissout directement dans le minerai. Lors d'un deuxième forage, il est utilisé des pompes pour acheminer des solutions sous terre, et ainsi permettre de ramener le mélange à la surface. Il est ensuite possible d'extraire l'uranium dissout à partir des solutions pompées vers la surface. Ce procédé permet de limiter la perturbation de l'environnement à la surface.

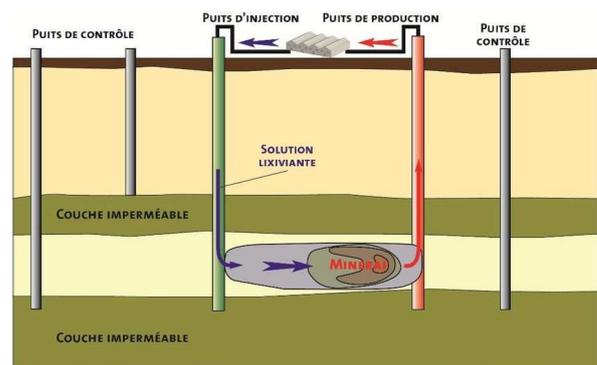


Figure 4 : Image courtesy Heathgate Resources

III. Transformation de l'uranium

a. Du minerai au «Yellow Cake»^[5-14]

L'uranium extrait des mines à ciel ouvert ou souterraines doit être séparé des impuretés et de sa matière rocheuse. C'est ce qui s'appelle la concentration de l'uranium. Cette étape se fait à proximité des sites d'extraction afin d'éviter un transport de matière inutile. Une fois extrait de la mine, il est traité en fonction de sa teneur en uranium par plusieurs techniques.

Dans un premier temps, un traitement dynamique est effectué pour le minerai riche, c'est-à-dire lorsque sa teneur en uranium est supérieure à 1 %. La première étape consiste à le concasser et le broyer, puis à le mélanger avec de l'eau ce qui permet de le faire circuler à travers l'usine par le biais de séries de circuits. Il y a ensuite une étape d'acidification. L'uranium est dissout dans de l'acide oxydant (souvent l'oxydant MnO_2 est ajouté à la solution) dans des réservoirs afin de le séparer des autres minerais présents dans la roche et surtout de le dissoudre, à hauteur de quelques grammes par litre. A cette étape, l'uranium se trouve dans une solution liquide, contrairement aux autres minéraux qui restent sous forme solide. La solution est pompée dans une cuve où de l'ammoniaque est ajouté le plus souvent (ou une autre base) pour faire précipiter l'uranium. L'uranium solide est conduit dans un four chauffé à $840\text{ }^{\circ}\text{C}$, afin d'éliminer les impuretés. Une fois la poudre séchée, elle est tamisée et acheminée vers un bac de stockage. La poudre obtenue est un concentré d'oxyde d'uranium (U_3O_8). C'est cette poudre qui est appelée «Yellow cake», de par sa couleur jaunâtre comme le montre la figure 5. Elle est ensuite emballée dans des fûts en acier, et sera transportée vers d'autres raffineries.



Figure 5 : Fût rempli de «Yellow Cake» ; source : CNA

Une autre possibilité est le traitement par lixiviation en tas (technique d'extraction de produits solubles par un solvant) par voie acide ou basique. Il s'agit d'une lixiviation en tas car le minerai

est d'abord amassé et tassé. Cette technique est mise en place pour les minerais à basse ou très basse teneur en uranium (< 1 %). Différentes étapes composent ce traitement. Pour la lixiviation acide, il faut concasser le minerai afin de le réduire à une taille adaptée. Cette étape sert à obtenir une pulpe (suspension à environ 60 % du minerai dans l'eau). Il y a une agrégation des grains qui est faite par un agglomérateur à l'aide d'eau et d'acide sulfurique. Il est important de diluer l'acide afin de diminuer la dissolution des impuretés (cadmium, bore, terres rares dues à l'extraction du minerai ou apportés par les réactifs d'extraction). L'objectif de cette étape est d'assurer la perméabilité et la bonne teneur des futurs tas. L'acide sulfurique permet la formation de complexes solubles de l'uranium à la valence VI (sous forme de $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_n^{(2n-2)-}$ avec $n = 1, 2$ ou 3 (exemple $n = 3$: $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3^{4-}$). Puis il y a acheminement du minerai jusqu'à l'aire de lixiviation par des convoyeurs. Ensuite, la mise en tas est réalisée par des élévateurs. Un arrosage continu du tas de minerai est fait, environ pendant trois mois par une solution acide. La matière est ensuite drainée et collectée. Le jus enrichi traverse les tas. L'étape finale consiste à extraire en l'uranium par un solvant.

La lixiviation peut être basique. Les étapes sont identiques, hormis l'attaque de l'uranium qui se fait par du carbonate de sodium. Cette méthode est utilisée lorsque le minerai est trop calcaire. L'uranium VI passe alors en solution sous forme $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_n^{(2n-2)-}$.

C'est seulement après séchage du minerai que l'on obtient une pâte jaune appelée «Yellow Cake» qui contient environ 75 % d'oxyde d'uranium.

Le «Yellow Cake» (U_3O_8) (figure 5) est un concentré d'uranium. C'est une poudre grossière qui n'est pas soluble dans l'eau et qui contient à peu près 80 % d'uraninite, fondant à peu près à 2878 °C. Cette poudre est calcinée pour être débarrassée de ses impuretés, conditionnée et mise en fût (contenant entre 450 et 600 kg de concentré d'uranium). Elle est ensuite expédiée dans les usines de conversion pour y subir de nouveaux traitements chimiques.

AREVA, opérateur de SOMAÏR et de COMINAK, assure une traçabilité totale de la production d'uranium, y compris pendant les phases de transport jusqu'aux usines de conversion chimique :

- La mise en fût est faite sur les sites : les fûts y sont numérotés, pesés et plombés.
- Le stockage en attente d'expédition est placé sous surveillance.
- Les tonnages «entrée» et «sortie» d'usine sont contrôlés et font l'objet de bilans

systematiques.

- Les transports sont effectués sous escorte, par exemple jusqu'au port d'embarquement de Cotonou, au Bénin où se situent des mines à ciel ouvert. La première partie se fait donc sur place avant son acheminement vers les différentes destinations. Sous contrôle des douanes, les fûts plombés sont placés dans des conteneurs également plombés.
- Le «Yellow Cake» est expédié en bateau vers les usines de conversion et d'enrichissement au choix du client. Une fois sur place, le concentré d'uranium est converti et enrichi.

b. Enrichissement de l'uranium [7, 8, 11-14]

Le «Yellow Cake» n'est pas utilisable dans un réacteur nucléaire, tel quel. Pour cela, il subit une purification complémentaire pour être converti en tétrafluorure d'uranium (UF₄), lui-même transformé en hexafluorure d'uranium (UF₆) ; ci-dessous les différentes étapes aboutissant à la formation de l'hexafluorure d'uranium. Cela permet de faciliter l'étape d'enrichissement.

L'étape de purification se fait en une seule étape par extraction liquide-liquide. Le «Yellow Cake» est dissous dans de l'acide nitrique, fournissant une solution de nitrate d'uranyle qui est remis en solution pour donner du nitrate d'uranyle UO₂(NO₃)₂ :



Le nitrate d'uranyle est ensuite extrait par de l'eau froide qui circule à contre-courant dans des colonnes pulsées. Il est obtenu une solution aqueuse de nitrate d'uranyle très pur. Le diuranate d'ammonium (NH₄)₂U₂O₇ est à nouveau précipité par réaction avec de l'ammoniaque. Le diuranate est calciné (350-400 °C) pour produire le trioxyde d'uranium UO₃ :



Le trioxyde d'uranium formé est réduit par l'hydrogène pour obtenir UO₂. Le dioxyde d'uranium est attaqué par l'acide fluorhydrique (hydrofluoration) dans un four pour produire du tétrafluorure d'uranium UF₄ :



UF₆ s'obtient par réaction du fluor sur le tétrafluorure.

Pour alimenter les réacteurs nucléaires, le combustible doit avoir une proportion en ²³⁵U d'environ

3 à 5 % (pour mémoire, l'uranium naturel n'en contient que 0,7 %) car c'est le seul isotope à pouvoir subir la fission nucléaire et libérer de l'énergie. Cette opération consistant à augmenter la proportion en ^{235}U s'appelle «enrichissement». Deux procédés d'enrichissement existent : la diffusion gazeuse et de l'ultracentrifugation.

1- Le procédé de diffusion gazeuse consiste à faire passer l'hexafluorure d'uranium à l'état gazeux à travers une multitude de membranes constituées de micros-trous. Puisque les molécules ^{235}U , plus légères, ont un peu plus de chances de traverser chaque membrane, cela permet de séparer une partie du ^{238}U qui est plus lourd. Cela produit ainsi de l' UF_6 ayant une plus forte concentration en ^{235}U . Sachant que les masses des deux isotopes sont très proches, l'opération doit être faite 1400 fois pour permettre d'obtenir un uranium assez enrichi en uranium 235, et ainsi être utilisable dans les centrales nucléaires.

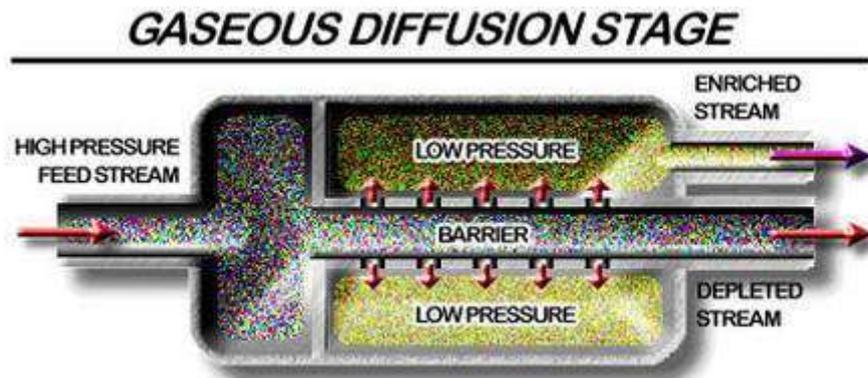


Figure 6 : Module de diffusion gazeuse utilisé pour l'enrichissement de l'uranium

2- Le second procédé, la centrifugation, se base sur le principe de séparation. L'uranium gazeux est introduit dans des centrifugations où il est séparé en deux flux : un flux enrichi en ^{235}U (environ 3 à 5 %), et un flux appauvri en ^{235}U (0.1 à 0.3 %). La centrifugeuse tournant à grande vitesse, l' $^{238}\text{UF}_6$ est projeté plus vite à sa périphérie que l' $^{235}\text{UF}_6$. Ainsi, de manière analogue à la diffusion gazeuse, cette étape doit être répétée un grand nombre de fois pour permettre son enrichissement progressif. Cette méthode est désormais la plus utilisée car elle consomme 50 fois moins d'énergie.

L' UF_6 est ensuite converti en oxyde UO_2 . Le traitement est fait dans un four rotatif, en présence de vapeur d'eau et d'hydrogène. Ceci permettant d'assurer la réduction de l' U^{VI} en U^{IV} :



c. Fabrication du combustible ^[13,14]

Afin de fabriquer le combustible, la poudre d' UO_2 est comprimée dans des moules cylindriques (mesurant 10 à 13 mm de longueur et 8 à 13,5 mm de diamètre) pour former des pastilles qui sont cuites à 1600-1700 °C. Ce processus permet de leur attribuer une certaine résistance et densité. Ces pastilles sont ensuite introduites dans des tubes métalliques de 3,85 mètres de long et 0,8 cm de côtés, appelés crayons. La gaine qui entoure les crayons est composée de zircaloy, un mélange de zirconium, d'étain, de fer, de chrome et de nickel et permet à l'assemblage de résister chimiquement et mécaniquement aux conditions de température et de pression de la cuve du réacteur. Ils sont remplis d'hélium et soudés de façon hermétique et contiennent 272 pastilles de 7 g chacune. La gaine constitue la première barrière d'étanchéité.



Figure 7 : Pastilles d'uranium ; source : AREVA



Figure 8 : Crayons ; source : CEA

Les Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) contiennent environ 264 assemblages de combustibles renfermant de 12 à 20 millions de pastilles.

IV. Utilisation de l'uranium dans les centrales nucléaires [15-17]

a. Fonctionnement d'une centrale nucléaire

Une centrale nucléaire (figure 9) fonctionne avec la fission de ^{235}U .

L'eau se trouvant dans le circuit primaire va être chauffée à 320 °C par la fission de l'uranium dans la cuve du réacteur. L'eau va rester à l'état liquide grâce à la pression qui est de 150 bars dans le circuit. Un échange de chaleur va se produire dans les générateurs de vapeurs entre le circuit primaire et le circuit secondaire. L'eau du circuit secondaire va passer de l'état liquide à l'état vapeur. La vapeur va faire tourner une turbine qui va faire fonctionner l'alternateur qui va entraîner la production d'électricité. Les vapeurs vont ensuite passer dans le condenseur et être refroidies par le circuit de refroidissement qui peut provenir de l'eau de mer ou d'un fleuve ou des aéroréfrigérants.

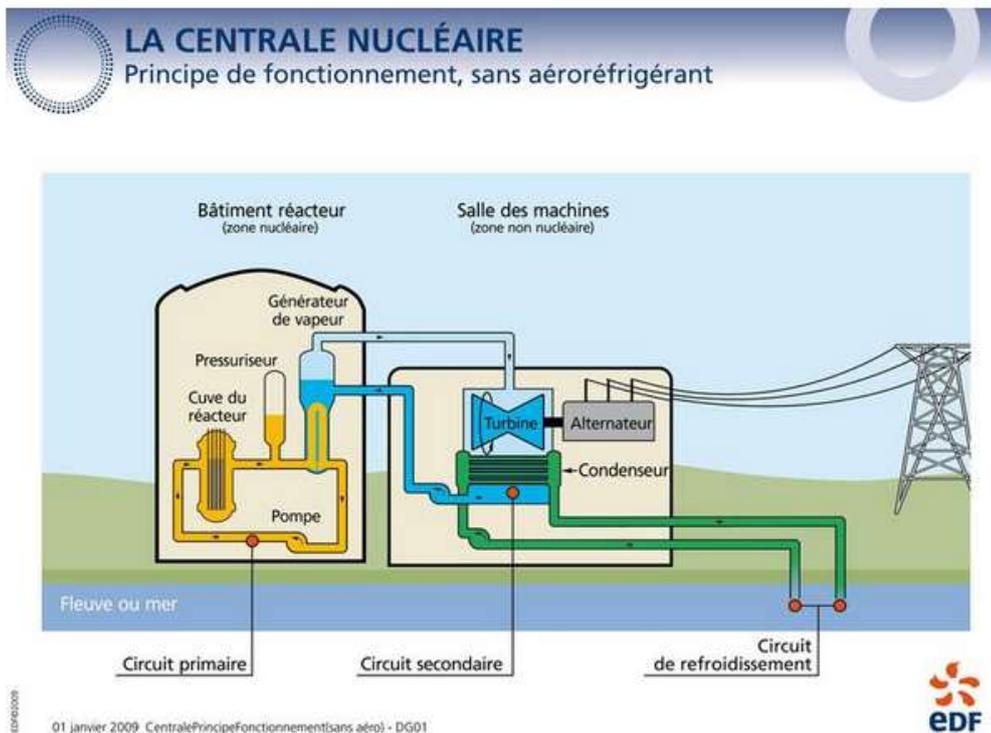


Figure 9: Schéma montrant le fonctionnement d'une centrale nucléaire

b. Utilisation de l'uranium dans un réacteur nucléaire

Le point clé d'une centrale nucléaire est le cœur du réacteur. L'uranium y est entreposé dans des crayons, chaque pastille d'uranium libérant une énergie équivalant à celle d'une tonne de charbon.

Le réacteur, représenté figure 10, est constitué de 157 assemblages. L'ensemble va séjourner pendant 4 à 5 ans dans le réacteur et subir des réactions de fission nucléaire.

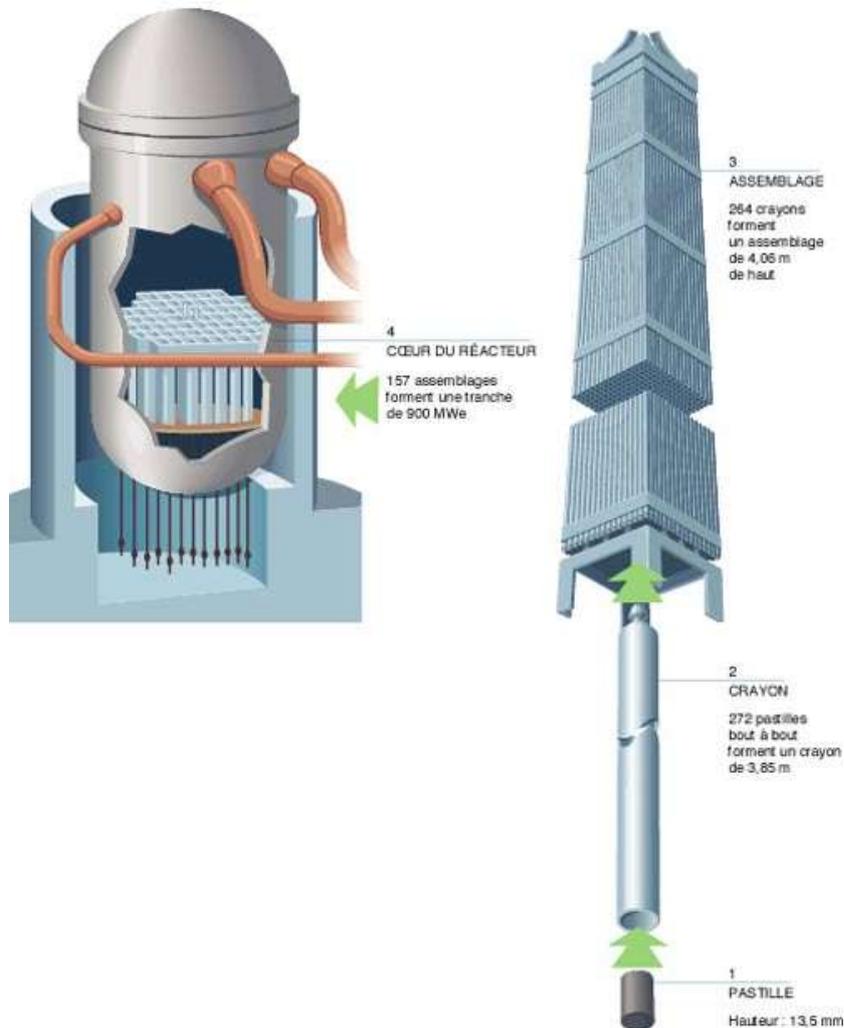
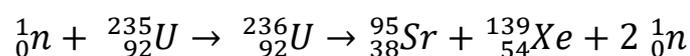


Figure 10 : Schéma montrant la composition du cœur du réacteur

Une réaction de fission a lieu lorsqu'un noyau lourd (Uranium, Plutonium, ...) se scinde en deux ou plusieurs noyaux plus légers et rejette 2 ou 3 neutrons. C'est noyaux lourds sont dit fissiles.

Dans le réacteur, un neutron est envoyé sur un noyau d' ^{235}U . Celui-ci va l'absorber pour donner de l' ^{236}U qui est très instable et se scindera en deux noyaux de masse moyenne, tout en rejetant un ou plusieurs neutrons :



La figure 11 ci-dessous montre les variations des rendements de fissions en fonction du nombre de masse. Le plus souvent, un noyau plus léger, de masse comprise entre 90 et 100 g/mole, est obtenu avec un deuxième noyau de masse plus lourde, comprise entre 135 et 145 g/mole. Il est peu probable d'avoir deux noyaux de masses identiques.

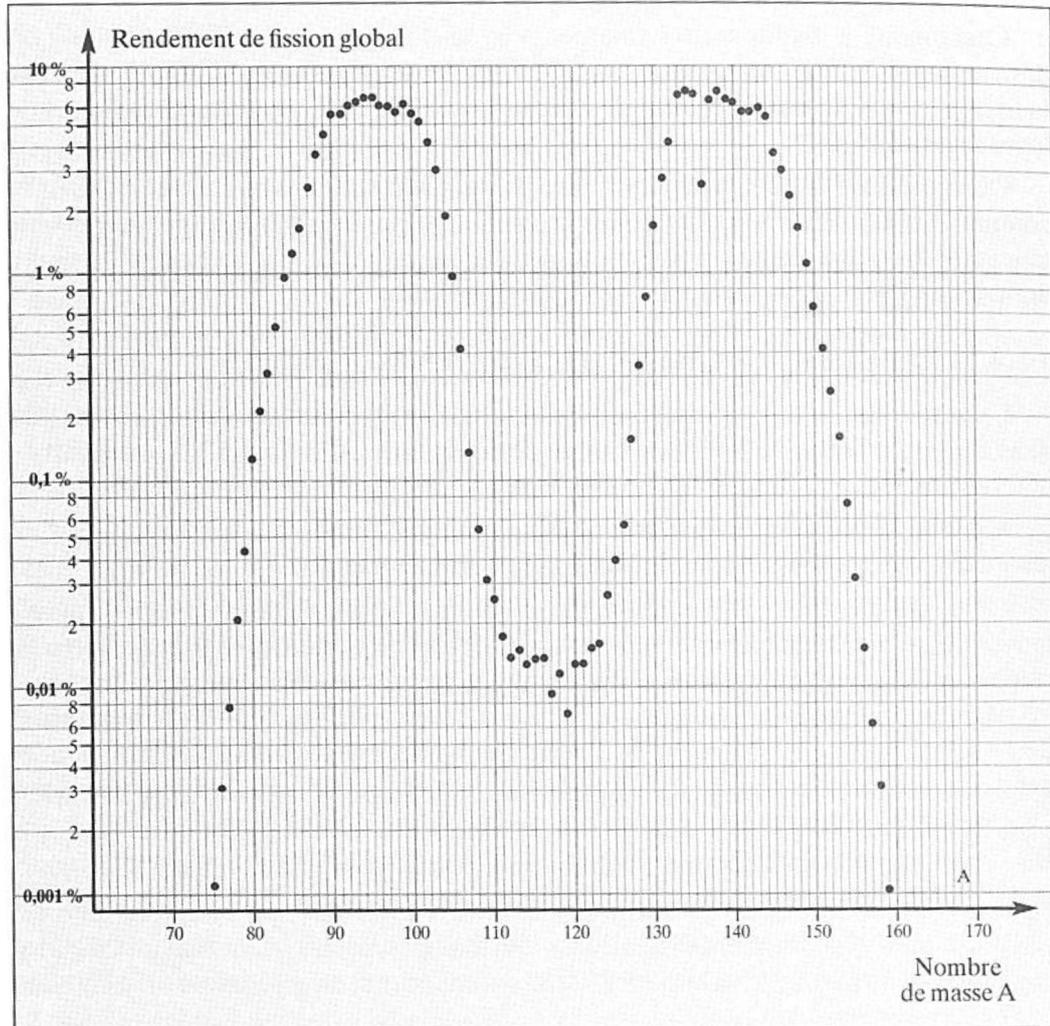


Figure 11 : Rendements de fissions globales pour l'²³⁵U

Dans certains cas, il peut se produire les fissions ternaires. C'est le fait que l'²³⁵U se scinde en trois noyaux soit avec un noyau de masse très petite comme des isotopes du noyau d'hydrogène (deutérium ²₁H ou tritium ³₁H).

Le fait que plusieurs neutrons sont projetés permet de déclencher une réaction en chaîne représentée figure 12.

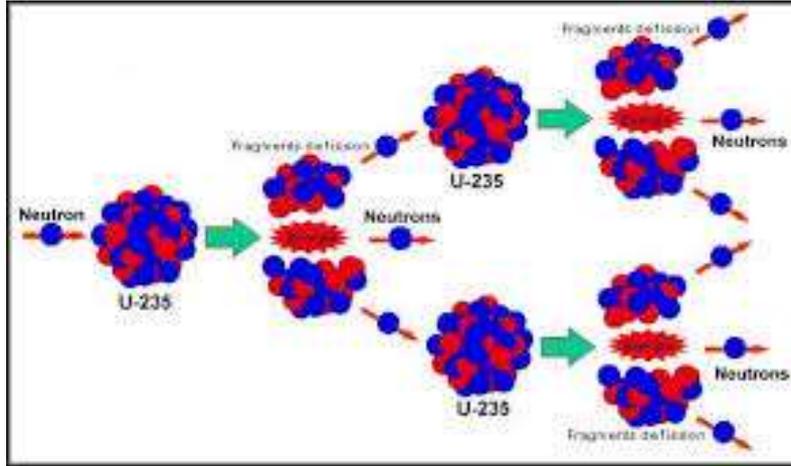


Figure 12 : Schéma de la fission de l'Uranium 235

La fission de l'uranium produit énormément d'énergie et de chaleur faisant monter la température de l'eau à 320 °C. Ceci s'explique par le fait qu'à partir du nombre de masse 60, l'énergie de liaison diminue régulièrement (figure 13).

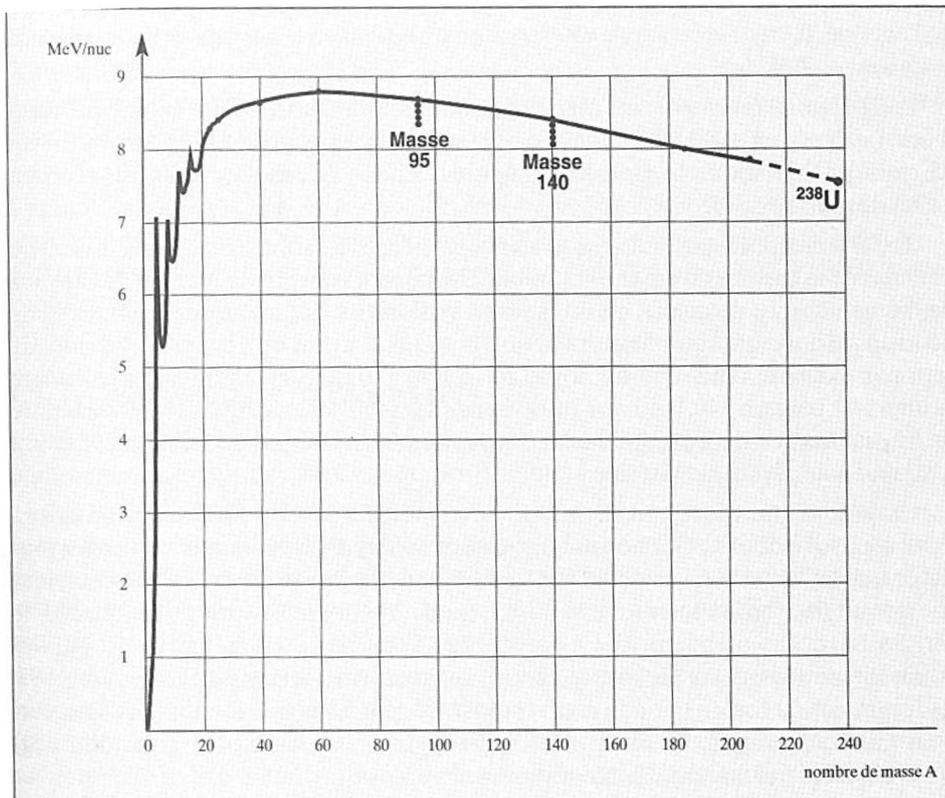
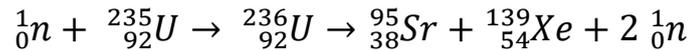


Figure 13 : Energie de liaison par nucléon en fonction du nombre de masse

D'après la figure 13, la cassure de l' ^{235}U va donner deux noyaux avec des énergies de liaison plus importantes que celle de l' ^{235}U , ce qui libère de l'énergie :



| Noyau | ${}^{235}\text{U}$ | ${}^{95}\text{Sr}$ | ${}^{139}\text{Xe}$ |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Energie de liaison du noyau | 1790 MeV | 814 MeV | 1151 MeV |
| Différence d'énergie | 175 MeV | | |

L'ordre de grandeur retenu pour l'énergie de fission est d'environ 200 MeV.

C'est ce phénomène qui justifie le fait que la fission libère beaucoup d'énergie.

Pour empêcher que la réaction ne s'emballe, des neutrophages sont introduits dans le circuit primaire comme le bore 10 sous forme d'acide borique ${}^{10}\text{B}(\text{OH})_3$ et vont absorber les neutrons. La réaction nucléaire est alors contrôlée.

L'uranium 235 est utilisé parce que c'est le seul noyau fissile naturel sur terre et présent en grande quantité. Le plutonium, lui aussi fissile, pourrait être utilisé mais, n'étant pas naturel, cela coûterait plus cher. Par ailleurs, celui-ci libère plus d'énergie que l' ${}^{235}\text{U}$ et pose problème au niveau des installations. Cependant, le plutonium est utilisé dans le combustible MOX (cf Chapitre V).

c. Le combustible en fin de vie

Tous les ans, environ un tiers du combustible est changé car au fur et à mesure de son utilisation, il s'appauvrit en ${}^{235}\text{U}$. Pour changer les assemblages, le réacteur est mis à l'arrêt et immergé sous huit mètres d'eau. Les assemblages sont enlevés du réacteur à la verticale un par un par de la manutention automatique pour protéger les humains des rayonnements ionisants. Chaque assemblage est transféré dans le bâtiment «combustibles» et entreposé dans une piscine pendant au moins un an en vue d'abaisser son activité.

V. Recyclage des déchets d'uranium [18, 19]

Lorsqu'un combustible est évacué des réacteurs nucléaires des centrales, près de 96 % de son contenu est recyclable (figure 14).

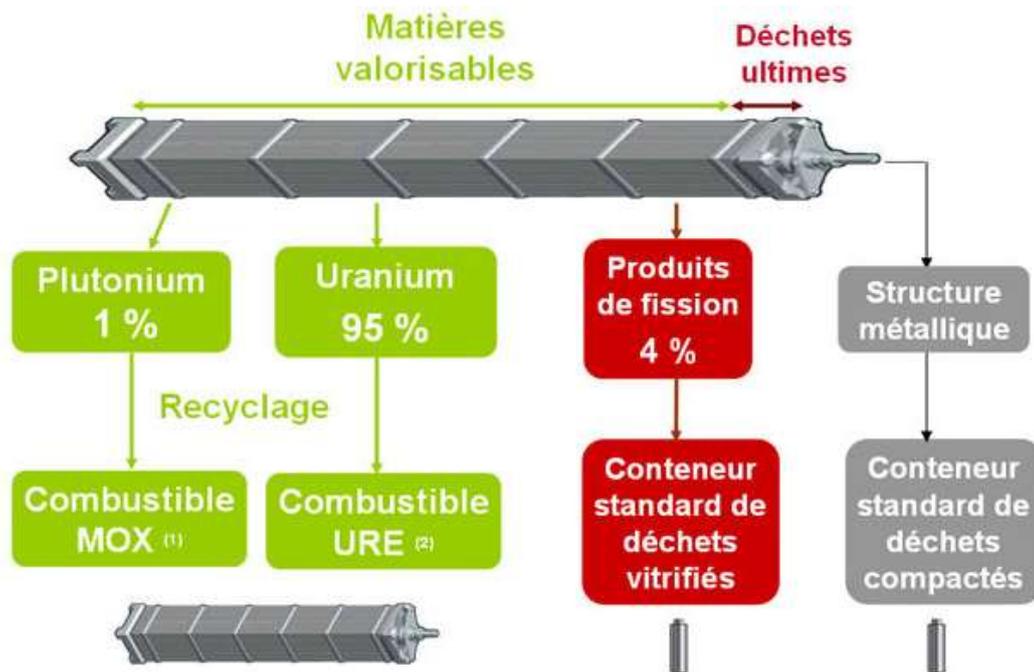


Figure 14 : Composition du combustible usé
(¹) Mélange d'Oxyde (de plutonium et d'uranium) ; (²) Uranium de Retraitement Enrichi)

Le plutonium présent dans le combustible usé est recyclé dans un combustible nucléaire appelé MOX. Le terme MOX est l'abréviation de «Mélange d'Oxydes». Il contient environ 8,5 % de dioxyde de plutonium (PuO_2) et 91,5 % de dioxyde d'uranium appauvri (UO_2), produit en poudre, granulés ou pastilles. Actuellement, le MOX n'est produit que par l'usine Melox, une entreprise filiale d'ORANO Cycle.

Quant à l'uranium, il est enrichi une seconde fois pour former du combustible URE (Uranium de Retraitement Enrichi).

Des produits de fissions sont aussi créés lors de l'utilisation du combustible. Lors du traitement, ils sont séparés, récupérés et vitrifiés.

De même, la structure métallique, après avoir été découpée et compactée, est placée dans des conteneurs.

ORANO Cycle à La Hague (Normandie) s'occupe principalement de la partie recyclage du combustible nucléaire usé (figure 15), de la réception du combustible usé au renvoi des conteneurs issus du retraitement aux clients-proprétaires.

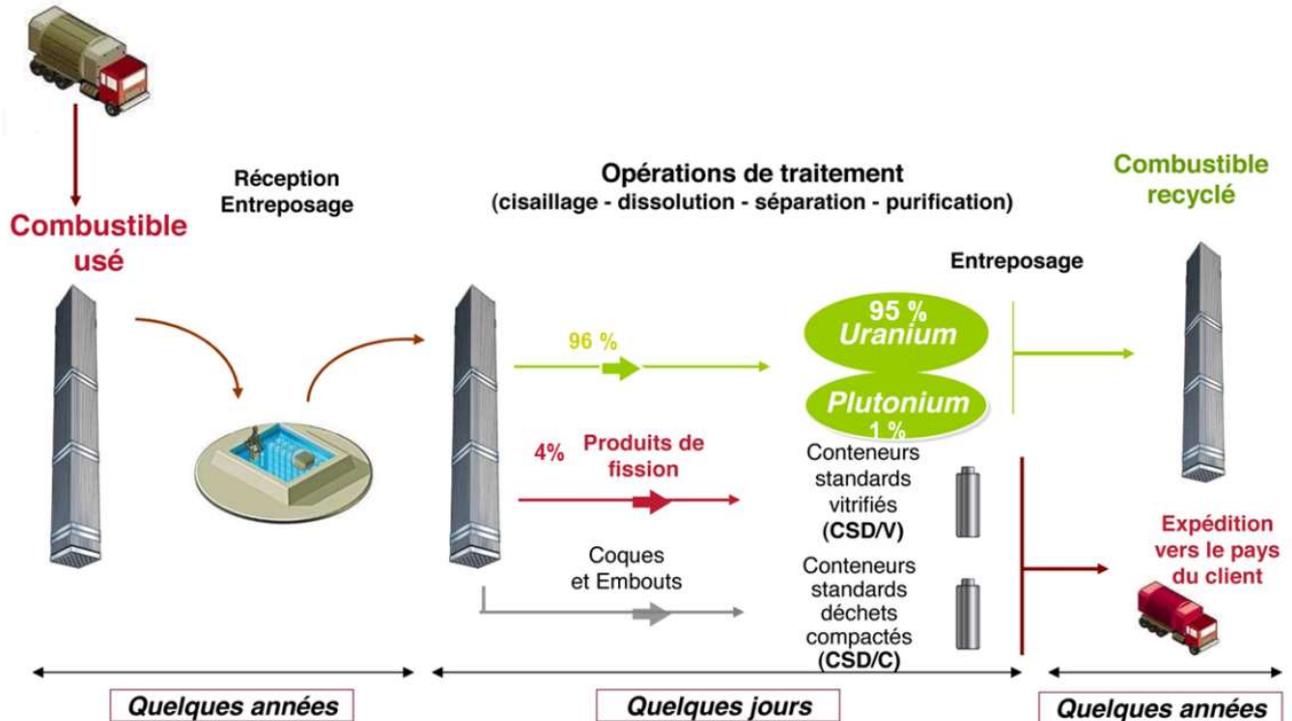


Figure 15 : Cycle du combustible nucléaire usé

1- La réception et l'entreposage :

Le combustible usé est reçu dans des châteaux, un conteneur conçu pour protéger la matière radioactive pendant le transport. Selon le type de château, le déchargement peut se faire à sec ou sous eau.

Tout d'abord, les châteaux arrivent en position horizontale. Ils sont contrôlés et relevés en position verticale avant d'être déchargés dans les piscines d'entreposage (déchargement sous eau, atelier NPH) où, les crayons contenus dans le château sont sortis puis plongés dans les piscines (déchargement à sec, atelier T0) sous 5 mètres pendant 3 à 5 ans pour les refroidir et laisser la radioactivité décroître.



Figure 12 : Combustible usé

2- Le cisailage et la dissolution :

Une fois la période d'entreposage terminée, le combustible usé passe ensuite dans l'atelier R1 ou T1 où le taux de combustion de l'élément combustible est contrôlé pour ensuite être cisailé en

tronçons de 3,5 cm de longueur. Les embouts de tête et de pied tombent directement dans un rinceur et sont envoyés au compactage. Les tronçons tombent dans un dissolvant contenant de l'acide nitrique concentré et bouillant pour dissoudre la matière nucléaire. Une roue à godets retient les coques et les envoie vers le rinçage pour rejoindre les embouts au compactage après décontamination. La solution d'acide nitrique s'évacue par trop plein vers l'unité de clarification pour séparer les « fines » de cisailage et les produits de fission insolubles par centrifugation. Ces produits sont entreposés avant vitrification dans les ateliers R7 et T7. Les solutions clarifiées sont envoyées vers les ateliers R2 et T2 pour la séparation des matières nucléaires.



Figure 16 : Combustible découpé en tronçons

3- L'extraction et la concentration :

L'uranium et le plutonium sont extraits (dans une colonne pulsée) de l'acide nitrique par un solvant, le TBP (tributylphosphate), tandis que les produits de fission restent en phase aqueuse. Ces produits de fission sont concentrés par évaporation, puis ils sont refroidis en attendant d'être vitrifiés. Le solvant quant à lui est lavé deux fois par une solution de soude et de carbonate de soude en colonne pulsée pour enlever les résidus de produits de fission et des actinides, puis distillé sous vide. Pour séparer le plutonium de l'uranium, le plutonium (Pu^{4+}) est réduit à la valence +III (Pu^{3+}) par l'uranium (U^{4+}) et devient insoluble dans le solvant ^[16] :



L'uranium est concentré par évaporation puis envoyé vers l'atelier T3 pour purification. Le plutonium est quant à lui envoyé vers l'atelier T4 pour purification.

4- La purification et le conditionnement :

L'uranium est purifié par voie humide dans l'atelier T3 par extraction liquide-liquide dans des batteries de mélangeurs-décanteurs en deux cycles successifs éliminant ainsi les reliquats d'émetteurs gamma et alpha qui sont envoyés vers l'atelier de vitrification. Les solutions d'uranium sont concentrées par évaporation puis, après contrôles et conditionnements, envoyées pour un nouveau cycle d'utilisation. Tous les solvants sont traités, décontaminés et recyclés.

Le plutonium est purifié dans l'atelier T4. La purification s'opère en deux cycles successifs d'extraction-réextraction liquide-liquide en colonne pulsée. Dans l'atelier R4, la purification s'effectue en un seul cycle d'extraction-réextraction par extracteurs centrifuges. Le plutonium est ensuite précipité en oxalate de plutonium ($C_4H_3O_8Pu$) puis filtré, séché et calciné à plus de 500 °C pour donner l'oxyde de plutonium (PuO). Le plutonium est ensuite conditionné dans des boîtes en inox serties d'environ 3 kg puis regroupées dans un étui. Les étuis sont regroupés dans un conteneur pour être envoyés vers les usines de fabrication du combustible MOX.

5- La calcination et la vitrification :

Les produits de fission et les « fines » arrivent dans les ateliers T7 et R7 pour être vitrifiés. Ils sont d'abord calcinés à environ 800 °C. Les produits de fission sont mélangés à de la fritte de verre puis tombent dans un four chauffé par induction à plus de 1100 °C pour former un verre homogène. Ce verre est coulé dans des conteneurs en acier inoxydable réfractaire, puis le conteneur est lavé, contrôlé et entreposé avant d'être retourné aux clients.



Figure 17 : Calcinateur

VI. Conclusion ^{[20, 21)}

Ce travail a permis de retracer le cheminement de l'uranium depuis son extraction jusqu'à son recyclage après passage dans le réacteur d'une centrale nucléaire. Il doit être transformé en «Yellow Cake» à sa sortie des mines, puis purifié et enrichi en ^{235}U avant d'être transformé en combustible. Ce combustible est ensuite entreposé dans des crayons dans les réacteurs des centrales nucléaires où ont lieu les réactions de fission qui produisent l'énergie nécessaire à notre quotidien.

L'exposition à la radioactivité de l'uranium est constante car cet élément est présent naturellement dans de nombreux éléments de la vie quotidienne (nourriture, eau, air, sol, etc). Il n'y a cependant pas d'effet nocif récurrent en présence d'un niveau naturel d'uranium qui reste très faible. Néanmoins, sur le long terme des réactions chimiques peuvent se développer après l'absorption de quantités importantes.

Les industries nucléaires, quant à elles, engendrent de par leur fonctionnement de nombreux impacts sur l'homme et sur l'environnement, ce qui rend la gestion des déchets produits nécessaire.

La gestion des déchets radioactifs est assurée par l'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets RADioactifs). Le Centre de Stockage de la Manche (CSM), premier centre de stockage de déchets radioactifs à avoir été exploité (1969), est actuellement en phase de fermeture. Il ne reçoit plus de déchets depuis 1994, et est sous surveillance active. Sa conception d'origine a permis de définir les grands principes des stockages de déchets radioactifs et l'ANDRA est aujourd'hui une référence dans le monde.

L'ANDRA met actuellement en place le Projet CIGEO (Centre Industriel de stockage GEOlogique). Ce projet a pour objectif de protéger l'homme et l'environnement à long terme des déchets radioactifs les plus dangereux qui ne peuvent être stockés en surface ou en faible profondeur car ces déchets ont des durées de vie très longues et une activité élevée. Ce centre devrait pouvoir accueillir les premiers déchets en 2025 et être en activité durant plus d'un siècle.

VII. Bibliographie

- [1] http://www.physique-et-matiere.com/extraction_de_1_uranium.php ; consulté le 08/10/2018
- [2] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-uranium-4212/> ; consulté le 08/10/2018
- [3] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Uranium> ; consulté le 29/01/2019
- [4] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reserves-d-uranium-naturel-dans-le-monde> ; consulté le 12/10/2018
- [5] <https://cna.ca/fr/technologie/energie/extraction-de-l-uranium/> ; consulté le 10/10/2018
- [6] http://www.physique-et-matiere.com/extraction_de_1_uranium.php ; consulté le 10/10/2018
- [7] <http://niger.areva.com/FR/niger-111/extraction-et-traitement-du-minerai-d-uranium-au-niger.html> ; consulté le 04/10/2018
- [8] <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geologie-uranium-monde-802/> ; consulté le 04/10/2018
- [9] Cameo Corporation, *Cameo Fuel Cycle - Milling*, 2011
<https://www.youtube.com/watch?v=1Mn8vzZ1nZ0> ; consulté le 14/01/2019
- [10] <https://cna.ca/fr/technologie/energie/traitement-de-l-uranium/> ; consulté le 08/11/2018
- [11] <http://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/dossier-cycle-du-combustible-nucleaire.aspx?Type=Chapitre&numero=2> ; consulté le 22/01/2019
- [12] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/enrichissement-de-l-uranium> consulté le 20/10/2018 ; consulté le 04/02/2019
- [13] P. Morvan, *Nucléaire, Les chemins de l'uranium*, Ellipses, 2004 (pages 28-52)
- [14] L. Patarin, *Le cycle du combustible nucléaire*, EDP Sciences, 2002 (chapitres 4 et 5)
- [15] <http://www.laradioactivite.com/site/pages/assemblagesdereacteursrep.htm?fbclid=IwAR0mYrKexxzPVbiTCfhPxzUvzWgFCljAw-jyscc1d-msR70lMYeWtSIUXg4> ; consulté le



16/11/2018

[16] https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-fission-nucleaire-2462/?fbclid=IwAR1o58z-NlmKFye3oxSLXr56HZrB_t6_dfVbofD1QwcKfbbFZ3wY4eC7
QVE ; consulté le 10/01/2019

[17] Y. Chelet, *La Radioactivité*, EDP SCIENCES, 2006 (pages 230-233 ; 416-419)

[18] <https://www.orano.group/fr/expertise-sur-tout-le-cycle/tour-des-implantations/recyclage-combustible-use/la-hague> ; ; consulté le 05/10/2018

[19] J-P. Moulin, P. Bretault, F. Meze, M. Martin / E. Tison, *Operation of the 2nd plutonium purification cycle (2cpu) in the rokkasho reprocessing plant (rrp)*, AREVA, 27/10/2006

[20] <https://www.andra.fr/cigeo> ; consulté le 24/01/2019

[21] <https://www.lenntech.fr/francais/data-perio/u.htm> ; consulté le 24/01/2019