

ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE 2007 - Partie D

LES DÉCHETS NUCLEAIRES

- Temps de préparation : 2h15 minutes
- Temps de présentation devant le jury : 10 minutes
- Entretien avec le jury : 10 minutes

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte au total : 17 pages, soit :

- un document principal de 7 pages, et 10 pages d'annexes
- Annexe 1 : généralités sur le noyau (5 pages),
- Annexe 2 : les réactions nucléaires lors de l'irradiation du réacteur (1 page),
- Annexe 3 : principe d'un réacteur nucléaire (1,5 pages),
- Annexe 4 : glossaire (2,5 pages).

Certains passages du présent document sont tirés de la revue n°53 des clefs du CEA.

TRAVAIL SUGGERE AU CANDIDAT :

Présenter les caractéristiques des déchets nucléaires et plus particulièrement celles des produits de fission puis exposer la méthode de transmutation envisagée pour leur traitement.

CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

- Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.
- Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.
- Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper mais tout sera à remettre au jury en fin d'oral.
- En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, etc.) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En entrant dans la salle d'oral, vous devez être prêts à débiter votre exposé.

A la fin de l'oral, vous devez remettre au jury le présent dossier, les transparents et les brouillons utilisés pour cette partie de l'oral, ainsi que TOUS les transparents et autres documents présentés pendant votre prestation

L'activité humaine entraîne chaque jour la production de nombreux déchets. Il s'agit de « *tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, de toute substance, matériau, produit, et plus généralement de tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon* ». Déchets ménagers, déchets industriels, déchets agricoles...la nature de ces déchets varie selon les secteurs d'activité et/ou le milieu d'où ils viennent. Parmi tous ces déchets, on compte les déchets radioactifs. La grande majorité d'entre eux ressemble aux déchets ménagers et industriels. Il s'agit, par exemple, d'outils, de tuyaux, de flacons... Leur particularité tient au fait qu'ils contiennent des éléments dont la **radioactivité**¹ est trop importante pour autoriser leur rejet dans l'environnement. Le risque qu'ils peuvent présenter pour l'homme a conduit à la mise en place d'une gestion très particulière et très contrôlée de leur devenir.

I-Que sont les déchets radioactifs ?

15 Les déchets radioactifs sont classés en différentes catégories, suivant leur niveau de radioactivité et la **période radioactive** des **radionucléides** qu'ils contiennent. Ils sont dits à vie longue lorsque leur période dépasse trente ans, à vie courte dans le cas contraire. La classification française comporte les catégories suivantes :

- les déchets de très faible **activité** (TFA) ; ils contiennent une quantité très faible de radionucléides, de l'ordre de 10 à 100 Bq/g (becquerels par gramme) ;
- Les déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FAMA-VC) ; le niveau de radioactivité de ces déchets se situe en général entre quelques centaines et un million de Bq/g, dont moins de dix mille Bq/g de radionucléides à vie longue. Leur radioactivité devient comparable à la radioactivité naturelle en moins de trois cents ans. Leur production est de l'ordre de 15000 m³ par an en France ;
- Les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) ; cette catégorie est constituée des déchets « radifères » provenant de l'extraction des terres rares dans des minerais radioactifs et des déchets « graphites » provenant de la première génération des réacteurs ;
- Les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL), très divers, que ce soit par leur origine ou par leur nature, dont le stock global représentait en France 45000 m³ fin 2004. Principalement issus des structures de combustibles usés ou de l'exploitation et de la maintenance des installations, ils comprennent notamment des déchets conditionnés lors des

¹ Les termes en caractères gras sont définis en annexe 4.

opérations de traitement du combustible usé (depuis 2002, les déchets de ce type sont compactés et représentent environ 200 m³ par an), des déchets technologiques provenant de l'exploitation ou de la maintenance courante des usines de production ou de traitement du combustible, des réacteurs nucléaires ou encore des centres de recherche (environ 230 m³ par an) ainsi que des boues de traitement d'effluents (moins de 100 m³ par an). La plus grande partie de ces déchets dégagent peu de chaleur mais certains d'entre eux sont susceptibles de relâcher des gaz ;

- Les déchets de haute activité (HA), qui contiennent les **produits de fission (PF)** et les **actinides mineurs** séparés lors du traitement des **combustibles** usés et incorporés à chaud dans une matrice vitreuse. Environ 120 m³ de « verre nucléaire » sont ainsi coulés chaque année. Ces déchets contiennent l'essentiel de la radioactivité (plus de 95 %) et sont, par conséquent, le siège d'un fort dégagement de chaleur qui demeure significatif à l'échelle de plusieurs siècles.

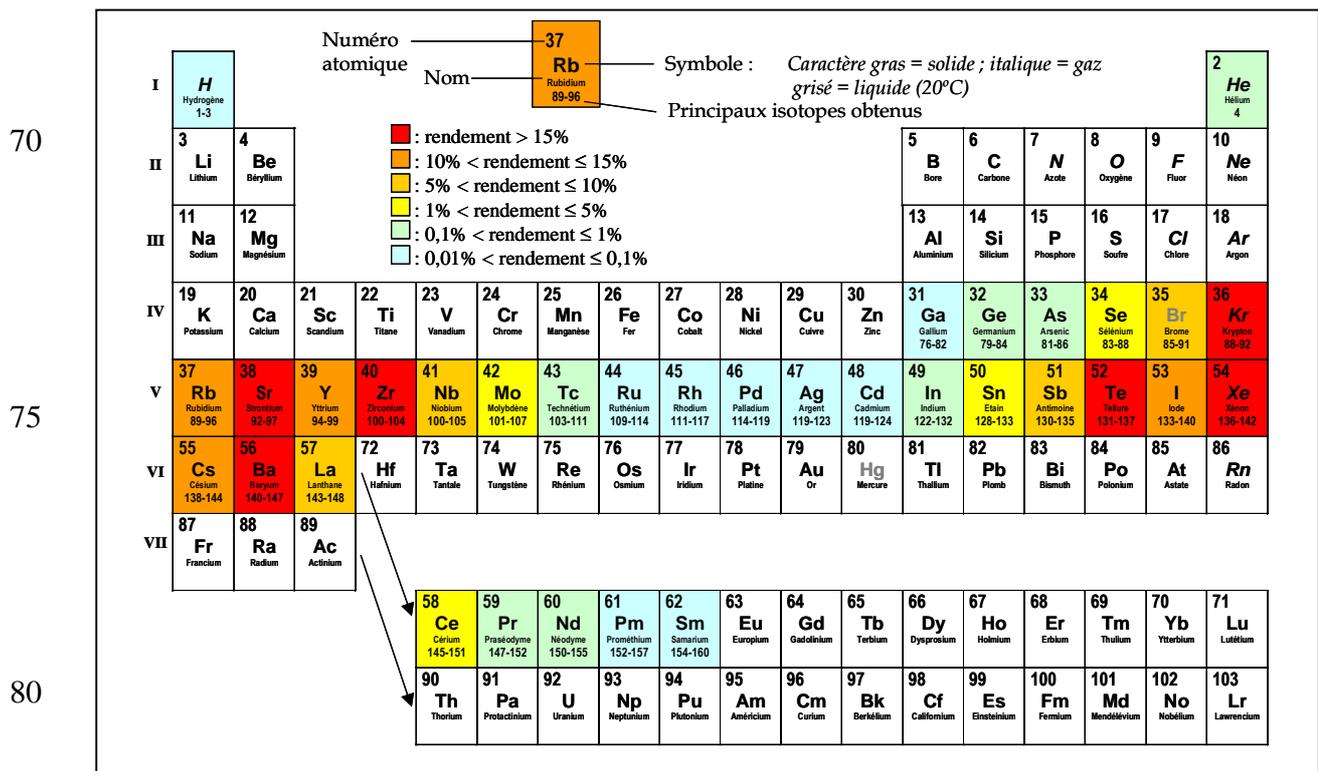
Globalement, les déchets radioactifs conditionnés en France représentent moins de 1kg par an et par habitant. Ce kilogramme est composé à plus de 90 % de déchets FMA-VC ne contenant que 5 % de la radioactivité totale ; 9 % de déchets MA-VL, moins de 1 % de déchets HA et pratiquement pas de déchets FA-VL.

II-Provenance des déchets du cycle électronucléaire

L'essentiel des déchets radioactifs de haute activité (HA) provient, en France, de l'**irradiation** dans les réacteurs électronucléaires de combustibles constitués de pastilles d'oxyde d'uranium enrichi UOX ou aussi, pour partie, d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium **MOX**. De l'ordre de 1200 tonnes de combustibles usés sont déchargés annuellement du parc des 58 **réacteurs à eau sous pression (REP)** d'EDF, qui fournit plus de 400 **TWh** par an, soit plus des trois quarts de la consommation électrique nationale.

La composition du combustible a évolué au cours de l'irradiation du réacteur. Peu après son déchargement, le combustible est constitué en moyenne d'environ 95% d'uranium résiduel, 1% de plutoniums et autres **transuraniens**, à hauteur de 0,1%, et 4% de produits issus de la fission. Ces derniers présentent une radioactivité très importante, au sens où elle nécessite des précautions de gestion mobilisant des moyens industriels puissants, de l'ordre de 10¹⁷ Bq par tonne d'uranium initial.

Figure 1 : Produits de fission de l'uranium 235 :

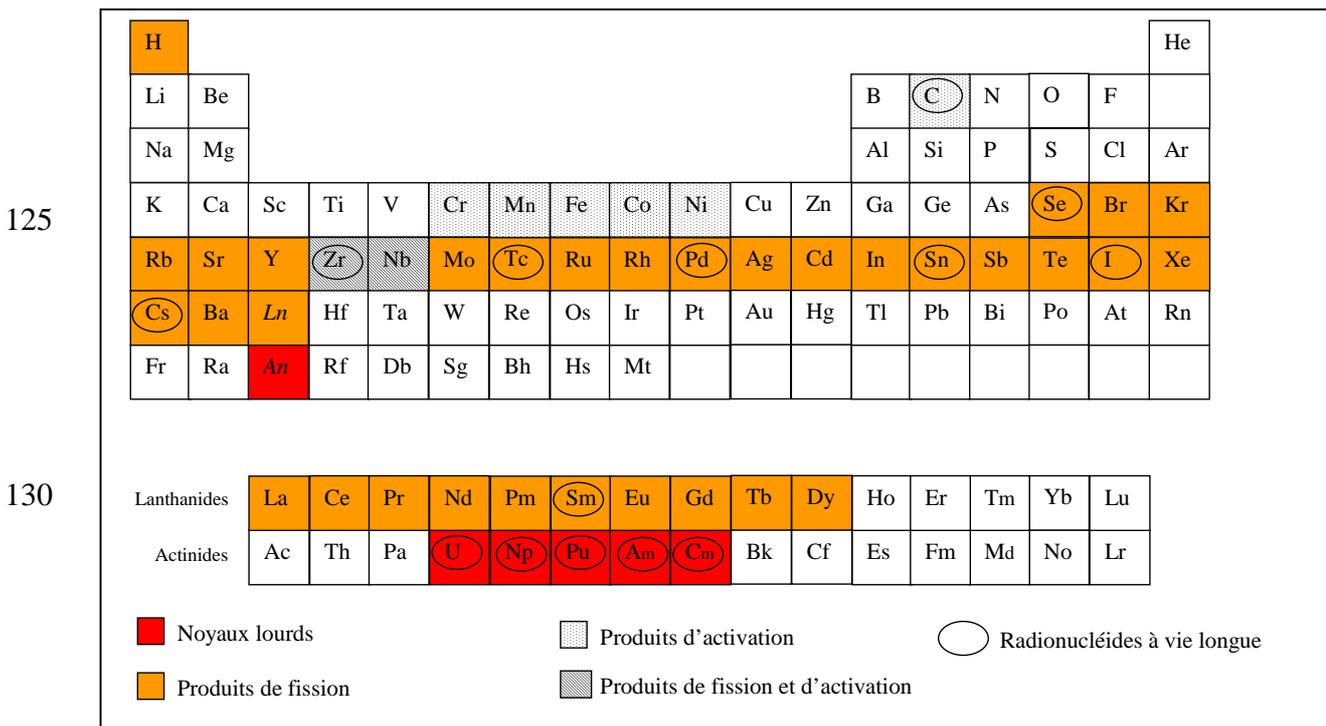


L'uranium contenu dans le combustible utilisé présente une composition évidemment différente de celle du combustible initial. Plus l'irradiation aura été importante, plus la consommation de **noyaux fissiles** aura été forte, et plus l'uranium aura donc été appauvri en ^{235}U fissile. Les conditions d'irradiation généralement mises en œuvre dans les réacteurs du parc français, avec un temps de séjour moyen du combustible en réacteur de l'ordre de quatre années pour un **taux de combustion** proche de 50 GWj/t, conduisent à ramener la teneur finale en ^{235}U à une valeur assez proche de celle de l'uranium naturel (moins de 1%). IL faut également mentionner la présence, en quantités plus faibles mais significatives, d'autres **isotopes** pénalisants au plan neutronique ou radiologique (^{232}U , ^{236}U) absents du combustible initial. Le plutonium (Pu) présent dans le combustible utilisé provient des processus de **captures neutroniques** et de **désintégrations** successives. Une partie du Pu disparaît par **fission** : ainsi, de l'ordre du tiers de l'énergie produite provient du « recyclage in situ » de cet élément. Ces phénomènes donnent également lieu à la formation de **noyaux lourds** présentant eux-mêmes, ou par l'intermédiaire de leurs **produits de filiation**, une période radioactive. Ce sont les éléments de la famille des **actinides**, et parmi eux essentiellement le plutonium (^{238}Pu à ^{242}Pu , les isotopes impairs formés ayant pour partie eux aussi subi des fissions durant l'irradiation), mais également le neptunium (Np), l'américium (Am) et le curium (Cm), dénommés **actinides mineurs** en raison de leur abondance moindre que celle de l'uranium et du plutonium, qualifiés d'**actinides majeurs**.

Les phénomènes d'**activation** de noyaux d'éléments non radioactifs concernent surtout les matériaux de structure, c'est-à-dire les matériaux des tubes, grilles plaques et embouts qui assurent la cohésion mécanique du combustible nucléaire. Ils conduisent notamment, pour ce qui est du combustible, à la formation de carbone 14 (^{14}C), de période 5730 ans, en quantité toutefois très limitées, largement inférieures au gramme par tonne d'uranium initial (g/tUi) dans les conditions usuelles.

Ce sont les produits issus de la fission de l'uranium 235 initial mais aussi de celle du Pu formé (isotopes 239 et 241), appelés produits de fission (PF), qui constituent la source essentielle de la radioactivité du combustible utilisé peu après son déchargement. Plus de 300 radionucléides, dont les deux tiers auront toutefois disparu par décroissance radioactive dans les années qui suivent l'irradiation, sont dénombrés. Ces radionucléides sont répartis selon une quarantaine d'éléments de la classification périodique, du germanium au dysprosium, avec la présence de tritium (^3H) issu de la **fission ternaire** de l'uranium 235. Ils sont caractérisés par une grande diversité : diversité des propriétés radioactives notamment avec des modes de désintégration différents mais aussi avec des périodes radioactives qui se mesurent en millions d'années pour certains alors que d'autres ont des durées de vie inférieure à la micro-seconde, et diversité des propriétés chimiques.

Figure 2 : Principaux éléments présents dans le combustible nucléaire utilisé



135 Le Pu est aujourd'hui recyclé sous forme de combustible MOX dans une partie du parc (une vingtaine de réacteurs à présents). L'uranium résiduel peut être pour sa part ré-**enrichi** (et recyclé en lieu et place de l'uranium minier). L'intensité de ce recyclage dépend du cours de l'uranium naturel, dont la hausse récente devrait conduire à augmenter le taux actuel (de l'ordre du tiers est recyclé en ce moment).

140

Ce recyclage de l'uranium et du plutonium est à la base de la stratégie de traitement aujourd'hui appliquée en France à la majeure partie des combustibles usés (actuellement, les deux tiers). Pour les quelques 500 kg d'uranium initialement contenu dans chaque élément combustible et après la séparation de 475 kg d'uranium résiduel et d'environ 5 kg de Pu, ces
145 déchets « ultimes » représentent moins de 20 kg de produits de fission et moins de 500 grammes d'actinides mineurs. Cette voie de gestion des déchets (ou cycle fermé), qui consiste à traiter aujourd'hui les combustibles usés pour séparer matières encore valorisables et déchets ultimes, se distingue des stratégies dans lesquelles le combustible usé est gardé en l'état, que ce soit dans une logique d'attente (choix différé de mode de gestion à long terme)
150 ou dans une logique dite du cycle ouvert, où les combustibles usés sont considérés comme des déchets et sont destinés à être conditionnés tels quels dans des conteneurs et stockés en l'état.

III-La transmutation

155 La transmutation est la transformation d'un noyau en un autre par une réaction nucléaire induite par des particules avec lesquelles on le bombarde. Appliquée au traitement des déchets nucléaires, elle consiste à utiliser ce type de réactions pour transformer des isotopes radioactifs à vie longue en isotopes à vie nettement plus courte ou même stables, en vue de réduire l'inventaire radiotoxique à long terme. Il est en théorie possible d'utiliser comme
160 projectile des photons, des protons ou des neutrons.

Dans le premier cas, il s'agit d'obtenir par **Bremsstrahlung** des photons qui peuvent donner lieu à des réactions (γ , xn) en bombardant une cible avec un faisceau d'électrons fournis par un accélérateur. Sous l'effet du rayonnement gamma (γ) incident, x neutrons sont éjectés du
165 noyau. Appliquées à des corps trop riches en neutrons et de ce fait instables comme certains produits de fission (strontium 90, césium 137,...), ces réactions aboutissent en général à des corps stables. Mais compte tenu de leur rendement très faible et du très haut niveau de courant d'électrons nécessaire, cette voie est jugée non viable.

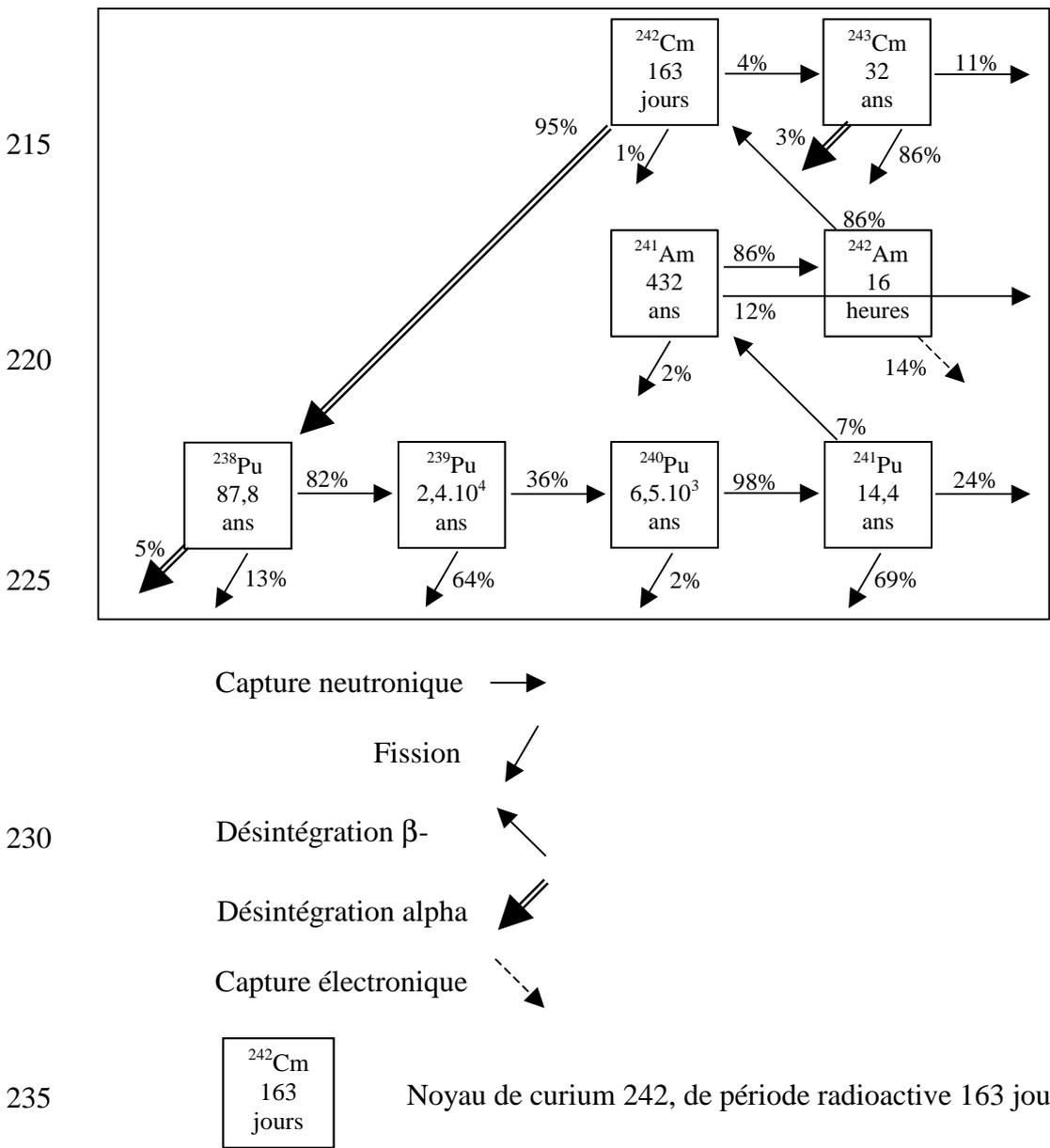
Dans la deuxième formule, l'interaction proton-noyau induit une réaction complexe, appelée **spallation**, qui conduit à la fragmentation du noyau et à la libération d'un certain nombre de particules dont des **neutrons** de haute énergie. La transmutation par interaction directe des **protons** n'est pas économiquement rentable car elle nécessite pour surmonter la barrière coulombienne des protons de très haute énergie (1 à 2 GeV) dont l'énergie de production est supérieure à celle récupérée lors du processus qui conduit à la génération du déchet. En revanche, la transmutation indirecte, en utilisant les neutrons de haute énergie (produits au nombre d'une trentaine environ, suivant la nature de la cible et l'énergie du proton incident) permet d'améliorer très sensiblement les performances. C'est cette voie qui est à la base des concepts des réacteurs dits hybrides.

La troisième particule utilisable est le neutron. De part l'absence de charge électrique, c'est de loin la particule qui satisfait au mieux les critères recherchés. Il est « naturellement » disponible en grande quantité dans les réacteurs nucléaires où il est utilisé pour générer des réactions de fission et produire ainsi de l'énergie et où d'ailleurs il induit en permanence des transmutations, la plupart non recherchées (voir figure 3 : représentation simplifiée de la chaîne d'évolution de l'américium 241 dans un réacteur à neutrons thermiques). La meilleure voie de recyclage des déchets serait donc de les réinjecter dans l'installation qui peu ou prou les a créés...

Lorsqu'un neutron entre en collision avec un noyau, il peut rebondir sur le noyau ou bien pénétrer dans celui-ci. Dans ce second cas, le noyau, en absorbant le neutron, acquiert un excès d'énergie qu'il va libérer de différentes manières : en éjectant des particules (un neutron par exemple) et en émettant éventuellement un rayonnement ; en émettant seulement un rayonnement : la capture neutronique (ou capture radiative) ; en se scindant en deux noyaux de tailles plus ou moins égales et en émettant simultanément deux à trois neutrons : réaction de fission. La transmutation d'un radionucléide peut donc se réaliser soit par capture d'un neutron soit par fission. Les actinides mineurs peuvent subir ces deux types de réactions nucléaires. Par fission ils sont transformés en radionucléides majoritairement à vie courte, voire en noyaux stables. Les produits de fission ne sont sujets qu'aux réactions de capture neutronique et subissent, en moyenne, quatre décroissances radioactives, de période n'excédant pas généralement quelques années avant de devenir stables. Par capture, ils sont transformés en d'autres radionucléides, souvent à vie longue, qui se transforment eux-mêmes par désintégration naturelle, mais aussi par capture et fission.

Les travaux menés au CEA ont montré que la transmutation en REP est techniquement peu efficace. Par contre, les caractéristiques des réacteurs à neutrons rapides, du type de Phénix, permettent d'envisager la transmutation des actinides mineurs, en utilisant des combustibles contenant des quantités significatives d'actinides mineurs (2,5% à 5%). Les réacteurs hybrides ont des potentialités en tant que réacteurs dédiés à la transmutation mais sont complexes et ont des performances limitées en termes de production d'électricité.

210 **Figure 3 : Représentation simplifiée de la chaîne d'évolution de l'américium 241 dans un réacteur à neutrons thermiques :**



Annexe 1 : Généralités sur le noyau

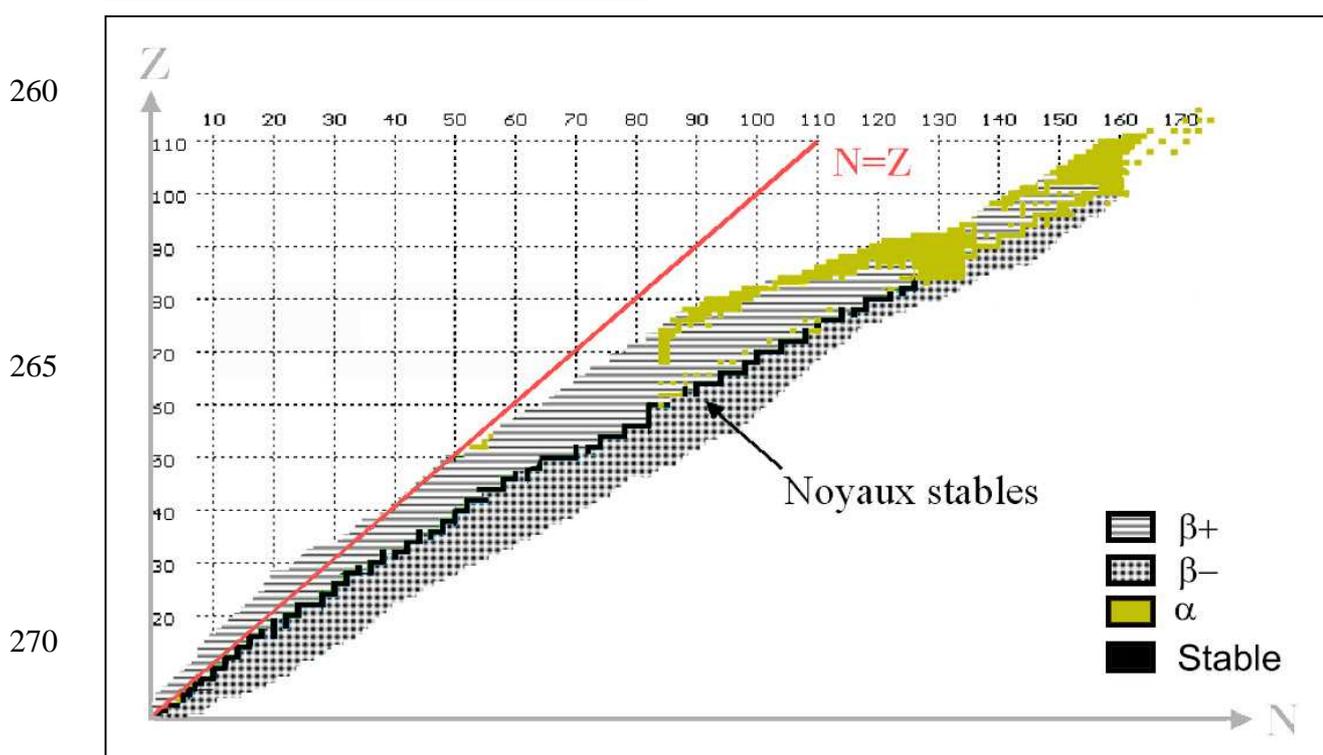
240 I-Le noyau

Le noyau est constitué de A nucléons dont Z protons ($Z \geq 1$) et N neutrons ($N \geq 0$).

Il est noté A_ZX avec : X qui correspond au symbole chimique (He, Pu, U,...), Z au nombre de protons et A au nombre de nucléons. A un « Z » correspond un et un seul « X » alors qu'à un « Z » donné peut correspondre plusieurs valeurs de A. Ils sont dits **lourds** quand leur nombre de nucléons A est supérieur à 140. Différentes catégories de noyaux sont définies, les deux principales sont les suivantes : les noyaux isotopes qui ont un même nombre de protons alors que leur nombre de nucléons est différent et les noyaux qui ont un même nombre de nucléons mais un nombre de protons différent appelés noyaux **isobares**.

250 Par ailleurs, certains noyaux se désintègrent au cours du temps : ils ne sont pas stables et sont donc dits instables. Tous ne se désintègrent pas selon le même processus et dans le même temps. Une désintégration se traduit par l'émission de rayonnement(s) et la naissance d'un nouveau noyau : le noyau fils. Les principaux modes de désintégration sont : la désintégration alpha (α) les désintégrations bêta ou encore appelées isobariques (β^- , β^+) ; et le principal mode de désexcitation est l'émission d'un photon γ .

Figure 4 : Le diagramme Z(N) présente les modes de désintégration principaux des noyaux connus (artificiels ou naturels) :



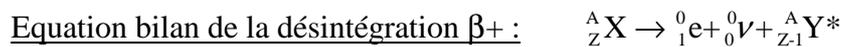
Les **noyaux stables** définissent une ligne appelée : **ligne de stabilité**. Les **noyaux instables émetteurs β^-** sont communément décrits comme « ayant trop de neutrons ». L'excès de neutron se traduit par une transformation d'un neutron en un proton. Deux rayonnements sont émis lors d'une désintégration β^- : un électron de grande vitesse (noté ${}^0_{-1}e$) et un anti-

275 neutrino (noté ${}^0_{0}\bar{\nu}$), seul l'électron interagira avec la matière environnante.



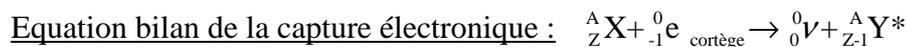
Les **noyaux instables émetteurs β^+** sont des « noyaux qui n'ont pas assez de neutrons ». Le défaut de neutron se traduit par une transformation d'un proton en un neutron. Deux rayonnements sont émis lors d'une désintégration β^+ : un positon de grande vitesse (noté 0_1e) et un neutrino (noté ${}^0_0\nu$), seul le positon interagira avec la matière environnante.

280



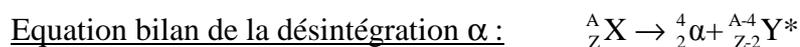
Il existe un phénomène concurrent à la désintégration β^+ appelé capture électronique.

285 Le noyau radioactif capture un électron de son nuage électronique, cet électron s'associe à un proton pour donner un neutron et un neutrino.



En fait, pour les **noyaux $Z \geq 87$** , le défaut de neutron du noyau trouve sa solution dans

290 l'**émission d'une particule α** , c'est-à-dire un noyau d'hélium-4 : ${}^4_2\text{He}$. Seuls les noyaux lourds (à quelques exceptions près) connaissent ce mode de désintégration.



La désexcitation nucléaire est la **libération d'énergie** par un noyau excité (état instable analogue à l'énergie potentielle) noté ${}^A_ZX^*$ et n'entraînant aucune modification de sa constitution. Cette libération d'énergie se traduit par l'émission d'un photon de grande énergie appelé photon gamma (γ).

295

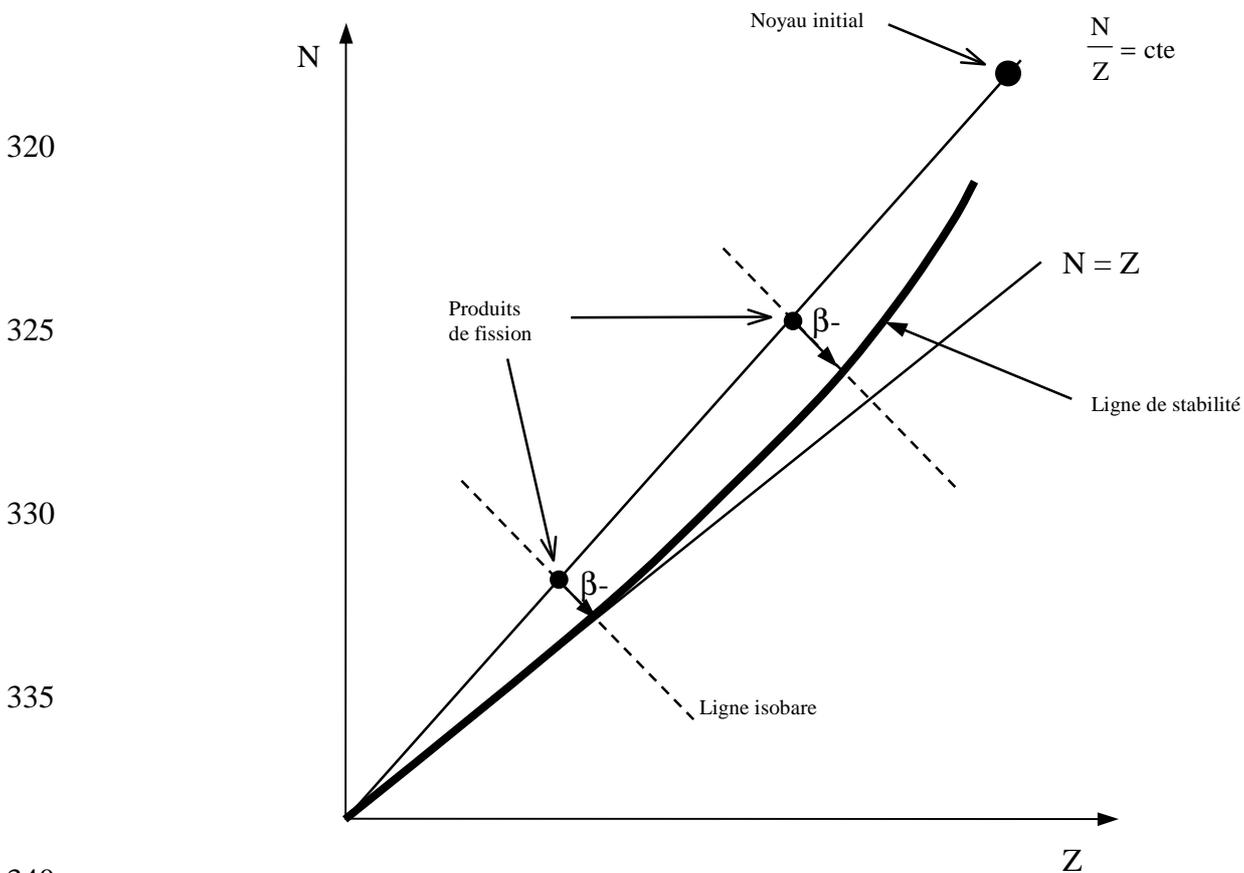


300

II-Comportement des produits de fission

Les noyaux issus de la fission des éléments lourds sont très variables d'une réaction à l'autre et sont constitués de nombreux noyaux dont le nombre de nucléons est compris entre 80 et 130. Le point commun de ces noyaux est d'être en général très instables. Ce fait caractéristique se comprend très bien lorsque l'on regarde le processus de fission à l'aide du diagramme (N, Z). Le point initial est un noyau très lourd ayant un rapport $\frac{N}{Z}$ déterminé (que l'on peut assimiler à un taux de « mélange » de neutrons et de protons). Lorsque le noyau fissionne, ce taux de mélange est approximativement conservé pour les deux noyaux fils, ce qui revient à dire que la fission se produit le long d'une droite $\frac{N}{Z} = \text{constante}$. La concavité de la ligne de stabilité impose alors aux produits de fissions de se retrouver dans la zone des émetteurs β^- :

315 **Figure 5 :**



Les produits de fissions peuvent avoir des périodes variant de quelques secondes à plusieurs décennies.

III-Décroissance radioactive et activité

345 3.1-Loi de décroissance radioactive

Une population de noyaux radioactifs identiques décroît constamment au cours du temps par transformation en d'autres noyaux (désintégrations). Cette évolution est caractérisée par une loi appelée loi de décroissance radioactive. Si il est impossible de prévoir à quelle date un noyau se désintégrera il est cependant possible de raisonner sur une population de noyaux

350 A_ZX .

La probabilité que N noyaux radioactifs identiques ont de se désintégrer entre deux instants t et t + dt est proportionnelle à la durée dt et au nombre de noyaux présents pendant

l'observation. La constante de proportionnalité est appelée constante radioactive et notée λ (unité s^{-1}), elle est caractéristique de chaque radioélément et est indépendante des conditions chimiques et physiques de l'atome. Ainsi : $N(t) - N(t+dt) = -dN = \lambda \times N \times dt$

Après intégration et avec les conditions initiales : $N(t=0) = N_0$, nous obtenons la loi de décroissance radioactive : $N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$

360

3.2-Période radioactive

La période radioactive (appelée aussi demi-vie) T d'une désintégration nucléaire caractérise la durée au bout de laquelle le nombre initial de noyaux est réduit de moitié. $T = \ln 2 / \lambda$

365 Exemples de T : $T(^{212}\text{Po}) = 0,3 \mu\text{s}$ $T(^{232}\text{Th}) = 14$ milliards d'années

Figure 6 : Loi de décroissance radioactive

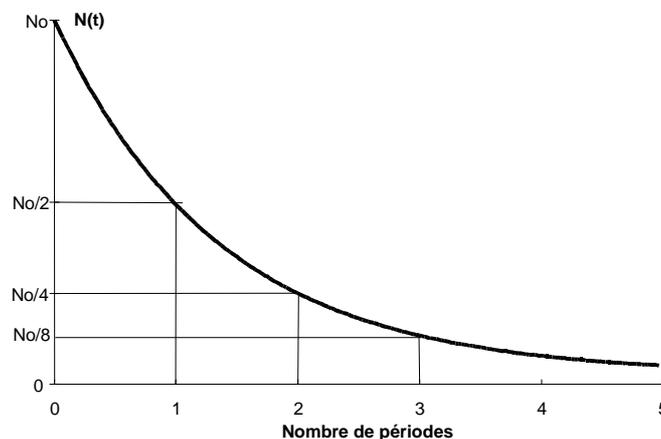
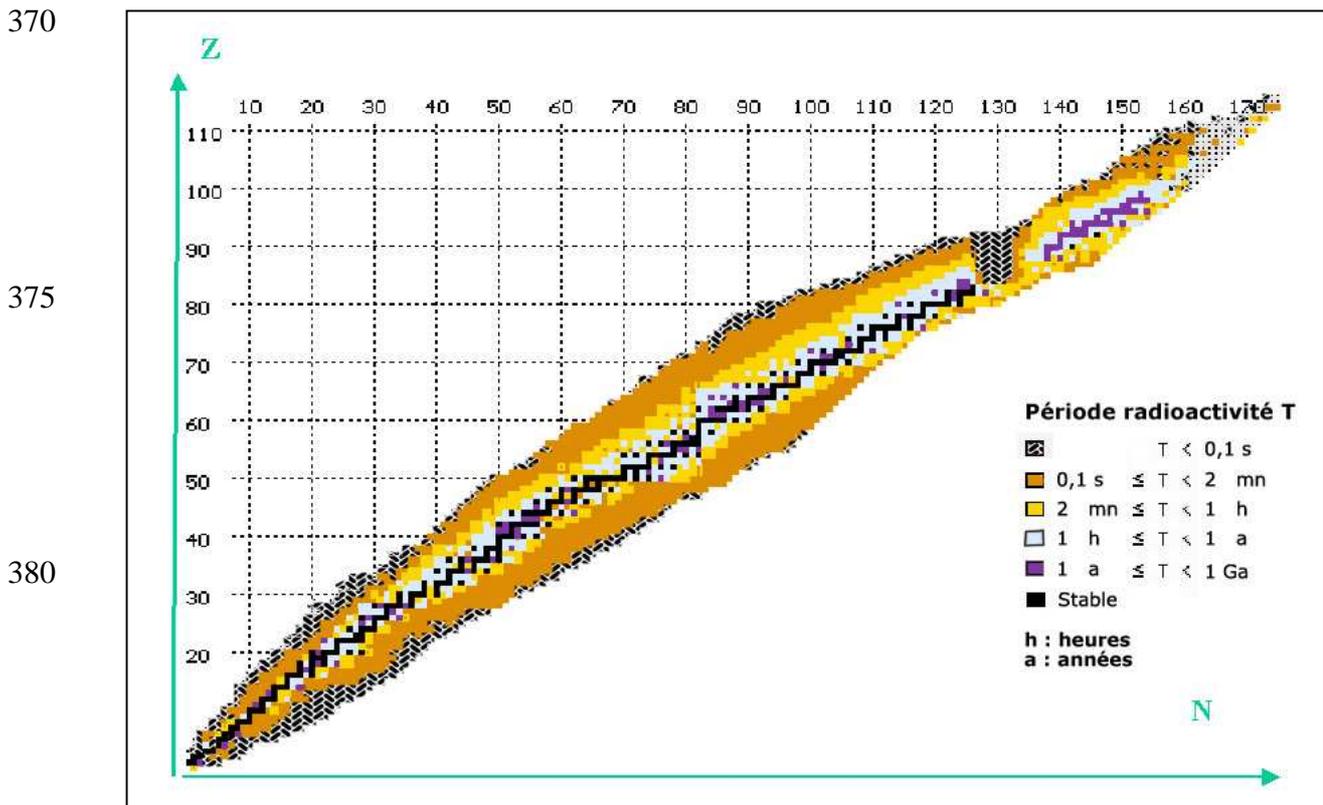


Figure 7 : diagramme Z(N) des périodes



385 3.3-Activité

L'activité radioactive $A(t)$ d'un échantillon est le nombre de noyaux radioactifs qui se désintègrent par unité de temps. $A(t) = \lambda \cdot N(t)$

L'activité est exprimée dans le système international en Becquerel (Bq). Elle correspond à une désintégration par seconde. Le Curie est une unité plus ancienne qui continue d'être utilisée dans la pratique: $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ (ce qui correspond à l'activité d'1 gramme de Radium).

Annexe 2 : sur les réactions nucléaires lors de l'irradiation du réacteur

395 I-Généralités

On appelle **réaction nucléaire** tous les processus susceptibles de modifier la **structure interne des noyaux**. On distingue 2 types de réaction nucléaire : les **réactions spontanées** (noyaux qui se transforment d'eux-mêmes, sans intervention extérieure) et les **réactions provoquées**.

Lors d'une réaction nucléaire plusieurs paramètres se conservent et se traduisent par des lois de conservation dont voici les quatre principales illustrées avec la réaction nucléaire suivante :



➤ **Conservation de la charge électrique :** $q_a + q_X = q_b + q_Y$

➤ **Conservation du nombre de nucléons :** $A_a + A_X = A_b + A_Y$

410 ➤ **Conservation du vecteur quantité de mouvement :** $\vec{p}_a + \vec{p}_X = \vec{p}_b + \vec{p}_Y$

➤ **Conservation de l'énergie :** $E_a + E_X = E_b + E_Y$

415 Avec : $E = m \cdot c^2 + E_c + E_p$
 E_c : énergie cinétique
 E_p : énergie potentielle \equiv énergie d'excitation du noyau : E^*

II-Principaux types de réactions nucléaires

420 ➤ **Diffusions nucléaires élastiques :** $a + X \rightarrow X + a$

Le projectile pénètre dans le noyau, la répartition d'énergie cinétique est modifiée.

425 ➤ **Transmutations :** $a + X \rightarrow b + Y$

Quelques exemples de transmutations :

430 - type (n, γ) : capture neutronique (ou radiative) ${}_0^1n + {}_{92}^{238}U \rightarrow {}_{92}^{239}U + \gamma$
Réaction nucléaire extrêmement présente dans le réacteur nucléaire.

- type (n, α) : ${}_0^1n + {}_5^{10}B \rightarrow {}_2^4He + {}_3^7Li$
- type (γ , xn) : $\gamma + {}_{38}^{90}Sr \rightarrow {}_{38}^{88}Sr + 2{}_0^1n$

435 ➤ **Radioactivité**

- Radioactivité α : ${}_{92}^{238}U \rightarrow {}_2^4\alpha + {}_{90}^{234}Th^*$

- Radioactivité β^- : ${}_{92}^{239}U \rightarrow {}_{-1}^0e + {}_{93}^{239}Np^* + {}_0^0\nu^-$
 ${}_{93}^{239}Np \rightarrow {}_{-1}^0e + {}_{92}^{239}Pu^* + {}_0^0\nu^-$

440 - Capture électronique ${}_{71}^{170}Lu + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_{70}^{170}Yb^* + {}_0^0\nu$

- Radioactivité β^+ : ${}_{50}^{109}Sn \rightarrow {}_1^0e + {}_{49}^{109}In^* + {}_0^0\nu$

445 ➤ **fission :** ${}_0^1n + {}_Z^AX \rightarrow {}_Z^{A+1}X^* \rightarrow PF_1^* + PF_2^* + 2\hat{a}3neutrons$

Exemples : ${}_0^1n + {}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{92}^{236}U^* \rightarrow {}_{55}^{137}Cs^* + {}_{37}^{97}Rb^* + 2{}_0^1n$

${}_0^1n + {}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{92}^{236}U^* \rightarrow {}_{68}^{173}Er^* + {}_{24}^{60}Cr^* + 3{}_0^1n$

450

Annexe 3 : principe d'un réacteur nucléaire

Les réacteurs nucléaires exploitent l'énergie dégagée par les fissions provoquées par des flux de neutrons sur des noyaux d'éléments lourds naturels ou artificiels (uranium ou plutonium). On dispose donc de barreaux de combustible, confinés dans des gaines métalliques, répartis
455 au sein d'un circuit *caloporteur* évacuant la chaleur vers un échangeur de chaleur (générateur de vapeur) puis une turbine ou un turboalternateur. Les différentes filières nucléaires résultent de choix sur l'énergie des neutrons incidents (réacteurs à *neutrons rapides*, ou à neutrons lents), sur la nature de l'élément modérateur, c'est à dire ralentissant les neutrons (eau légère, eau lourde ou graphite) puis enfin sur des paramètres thermohydrauliques (caloporteur gazeux
460 ou liquide, circuit mono ou diphasique, pressurisation, etc.). L'**enrichissement** en matière fissile du combustible ou l'emploi d'uranium naturel résulte de ces choix. Certaines captures neutroniques peuvent produire de nouveaux éléments fissiles. Le retraitement des combustibles usés (récupération du Pu 239) et le rechargement en cœur (combustible MOX, "mixed oxydes") permettent d'optimiser le cycle du combustible.

465

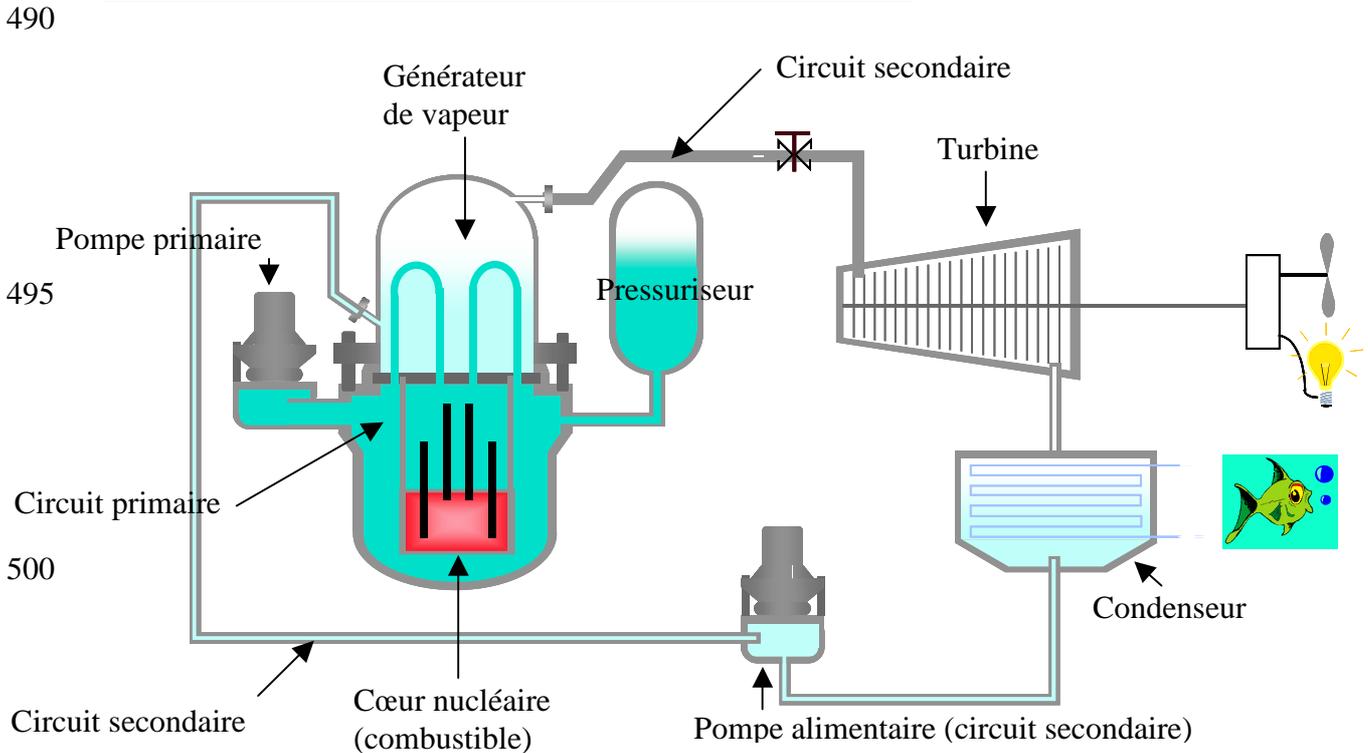
L'énergie dégagée par une fission est de 200 MeV. Le bilan "matière" se résume en la production de 2 à 3 neutrons pour un seul neutron absorbé, l'émission de rayonnements gamma et l'apparition de produits de fission émetteurs radioactifs dont l'évolution lente conduit à une puissance résiduelle et une radio-nocivité importantes sur de longues périodes.

470

Ces fissions provoquées exploitent la neutralité de la particule "neutron", donc sa liberté de mouvement, et son énergie cinétique (environ 2 MeV : neutron « rapide ») lors de sa production, soit au démarrage par des sources artificielles, soit en fonctionnement par les neutrons issus des fissions antérieures : c'est le principe même de la réaction en chaîne. Le
475 contrôle de cette réaction en chaîne est donc indispensable pour éviter tout emballement du processus, les générations se succédant tous les 10^{-4} secondes. On dispose ainsi dans le réacteur des matériaux capturant les neutrons en excédents, la régulation se faisant par insertion variable de "grappes de contrôles", éléments mobiles, ou de bore neutrophage dissous dans le circuit du *caloporteur* destiné à l'évacuation de la chaleur produite. La sûreté
480 est assurée par des contre-réactions efficaces en toute circonstances et des dispositifs d'alarme stoppant les processus. Il en résulte donc un bilan exactement contrôlé de la population neutronique résultant de l'équilibre des productions de neutrons par fission et de leur disparition par absorption (capture et fission) ou par fuites.

Les assemblages combustibles, la plupart "grappés" par des absorbants de contrôle dont les
485 moteurs de commande traversent le couvercle de la cuve, sont placés dans la zone de cœur. Le
circuit primaire, récupérant la chaleur à l'intérieur de la cuve, circule par des systèmes de
pompage vers des générateurs de vapeurs pour la production d'énergie.

Figure 8 : schéma simplifié d'un REP de propulsion navale



Annexe 4 : Glossaire

Actinides : radioéléments de numéro atomique compris entre 89 (actinium) et 103
(lawrencium). Les **actinides majeurs** sont l'uranium et le plutonium, ils sont appelés ainsi car
510 majoritairement présents dans le combustible nucléaire (le thorium peut aussi être considéré
comme un actinide majeur). Les **actinides mineurs** sont les noyaux autres que les isotopes
d'uranium et de plutonium, formés en relativement faibles quantités en réacteur par captures
neutroniques successives à partir des noyaux du combustible ou par décroissance radioactive.
Ces éléments, essentiellement du neptunium, de l'américium et du curium, sont eux-mêmes
de période longue ou un au moins de leurs produits de décroissance l'est.

515 **Activation** : action tendant à rendre radioactifs certains éléments stables par bombardement
par des particules, des neutrons par exemple.

Activité : nombre de noyaux radioactifs qui se désintègrent par seconde (voir annexe 1, p 12)

520 **Bremsstrahlung** : terme allemand signifiant rayonnement de freinage. Rayonnement
électromagnétique de haute énergie généré par des particules chargées (souvent des électrons)
accélérées (ou décélérées).

525 **Capture neutronique** : absorption par un noyau d'un neutron libre ne conduisant pas à une fission, mais s'accompagnant de l'émission d'un photon gamma. (Ex : ${}_0^1n + {}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{92}^{239}\text{U} + \gamma$)

Cœur : région d'un réacteur nucléaire à fission comprenant le combustible nucléaire agencée pour être le siège d'une réaction en chaîne.

530 **Combustible** (nucléaire) : matière contenant des noyaux fissiles qui permet d'assurer l'entretien de la réaction en chaîne dans le cœur d'un réacteur.

Désintégration : transformation d'un noyau instable en noyau stable ou instable qui voit se modifier le nombre et la nature des nucléons.

535 **Enrichissement** : processus par lequel est accrue la teneur d'un isotope d'un élément. Dans le cas de l'uranium il s'agit d'augmenter la proportion d' ${}^{235}\text{U}$ de l'uranium naturel (0,7 % d' ${}^{235}\text{U}$ et 99,3 % d' ${}^{238}\text{U}$) à des taux de 3 à 10%.

540 **eV** : electron volt : $1 \text{ eV} = 1,6.10^{-19} \text{ J}$

Fissile : se dit d'un noyau qui peut fissionner quelque soit l'énergie cinétique du neutron incident, exemples : ${}^{235}\text{U}$ et ${}^{239}\text{Pu}$.

545 **Fission** : scission d'un noyau lourd, suite à l'interaction avec un neutron incident, en plusieurs noyaux plus légers (généralement il y a 2 produits de fission), accompagnée d'émission de 2 à 3 neutrons, de rayonnements et d'un important dégagement d'énergie.

Fission ternaire : fission en trois fragments

550 **Isotopes** : noyaux qui ont un même nombre de protons alors que leur nombre de nucléons est différent.

Isobares : noyaux qui ont un même nombre de nucléons alors que leur nombre de protons est différent.

555 **Irradiation** : Exposition à des rayonnements ionisants. Dans le cas des combustibles nucléaires ceux ci sont exposés à un flux de neutrons.

MOX (Mixed Oxides) : mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium qui sert de combustible nucléaire dans certaines centrales.

560 **Neutron** : particule dépourvue de charge électrique qui entre dans la composition des noyaux atomiques. C'est le neutron qui provoque la réaction de fission des noyaux fissiles.

Noyau : partie centrale des atomes, de charge positive. (voir annexe 1).

565 **Période radioactive (T)** : durée nécessaire à la désintégration de la moitié d'une population de noyaux identiques (voir annexe 1, page 11).

570 **Produits de filiation** : un noyau qui se désintègre peut engendrer un noyau radioactif qui va donc lui aussi se désintégrer pour former un autre noyau et ainsi de suite jusqu'à obtenir un noyau stable. Ces désintégrations en série s'appelle une filiation radioactive et les noyaux qui la compose sont les produits de cette filiation.

- 575 **Produits de fission (PF)** : noyaux issus de la fission.
- Proton** : particule de charge électrique positive qui entre dans la composition des noyaux.
- 580 **Radioactivité** : propriété qu'ont certains noyaux (naturels ou artificiels) de se désintégrer spontanément pour former d'autres noyaux, en émettant des rayonnements ionisants. On désigne plus généralement sous cette appellation l'émission de rayonnement accompagnant la fission.
- Radionucléide** : noyau radioactif.
- 585 **Réacteur nucléaire** : voir annexe 3.
- Réaction en chaîne** : suite de fissions nucléaires au cours desquelles les neutrons libérés provoquent de nouvelles fissions, qui libèrent de nouveaux neutrons, etc.
- 590 **Spallation** : réaction nucléaire mettant en jeu un noyau lourd cible et une particule, le plus souvent un proton, accélérée jusqu'à une énergie de quelques centaines de MeV à quelques GeV. Par réactions successives, un faisceau de telles particules permet de produire un grand nombre de neutrons. Un proton de 1 GeV projeté sur une cible de plomb peut ainsi générer de 25 à 30 neutrons.
- 595 **Taux de combustion** : rapport du nombre de noyaux d'un élément qui disparaissent par fission sur le nombre de noyaux initialement présents dans le combustible. Couramment utilisé pour évaluer l'épuisement spécifique, quantité d'énergie thermique par unité de masse de combustible obtenue en réacteur entre le chargement et le déchargement (combustion massique), il s'exprime en mégawatt (thermique) jour par tonne (MWj/t).
- 600 **Terres rares** : groupe des lanthanides, éléments de numéro atomique compris entre 57 (lanthane) et 71 (lutécium), auxquels sont ajoutés, du fait de leurs propriétés chimiques, l'yttrium et le scandium.
- 605 **Transuraniens** : tous les éléments dont le numéro atomique est supérieur 92.
- TWh** : terawattheures : soit 10^{12} Wh