

Jean-Pierre Lévêque

Petit livre illustré des combustibles nucléaires



Sommaire

1 – Préambule et introduction	7
2 – Qu'est-ce qu'un combustible nucléaire ?	11
2.1 – Comment crée-t-on de l'énergie nucléaire ? ...	11
2.2 – Fissile ou fertile.....	13
2.3 – Pour résumer (et expliquer certains phénomènes).....	18
3 – Les réacteurs nucléaires électrogènes à travers les âges.....	21
3.1 – Comment reconnaître un type de réacteur nucléaire ?.....	21
3.2 – Les divers types de réacteurs nucléaires	22
4 – Comment passe-t-on du minerai d'uranium à l'oxyde d'uranium enrichi ?	53
4.1 – Le « cycle » du combustible : la partie amont.	53
4.2 – De la mine à la première conversion.....	56
4.3 – Les deux conversions de l'uranium et son enrichissement	65

5 – La fabrication des combustibles nucléaires	75
5.1 – Pourquoi l'oxyde d'uranium ?	77
5.2 – La fabrication des pastilles d'oxyde d'uranium (UO_2 ou UOX)	82
5.3 – La fabrication des pastilles MOX pour les REP [(U,Pu) O_2]	87
5.4 – Combustibles REP et combustibles REB	94
5.5 – La fabrication des combustibles MOX pour RNR	95
5.6 – Fabrication des particules TRISO pour combustible HTR	99
5.7 – Mais encore	101
5.8 – Quelques mots sur la gaine des crayons	102
6 – Les moyens d'examen après irradiation (PIE)	105
6.1 – Présentation générale	107
6.2 – Les examens non-destructifs	108
6.3 – Perçage et mesure des gaz	110
6.4 – Les examens destructifs et microstructuraux..	112
6.5 – Les essais à effets séparés	114
7 – Le comportement des combustibles en réacteur	121
7.1 – Quelques rappels	121
7.2 – Les combustibles REP	123
7.3 – Spécificités des combustibles MOX dans les REP	143
7.4 – La gestion des combustibles dans les réacteurs REP et REB	148

7.5 – Cas des combustibles pour réacteurs rapides refroidis au sodium	150
7.6 – Cas des particules TRISO pour réacteurs HTR	157
8 – La simulation du comportement des combustibles.....	161
9 – La sûreté des combustibles nucléaires.....	167
10 – Les limites de fonctionnement	173
10.1 – Les combustibles REP.....	173
10.2 – Les combustibles RNR (ou SFR).....	181
10.3 – Les autres types de combustible.....	182
11 – Et le retraitement, pour boucler (ou presque) le cycle.....	185
Remerciements et avertissement	200
Petit glossaire	203
Références	207

1

Préambule et introduction

Ce petit livre est écrit à l'intention des lecteurs peu informés de ce que sont les combustibles nucléaires afin qu'ils puissent se faire une toute première idée des diverses questions que se posent les ingénieurs et les chercheurs qui travaillent dans ce domaine et des améliorations que l'on peut attendre de ces travaux.

Les spécialistes et les scientifiques seront donc, très probablement, déçus de son contenu, mais ils pourront trouver de quoi satisfaire leur curiosité dans des ouvrages dont on cite deux exemples, parmi de nombreux autres, dans les références en fin de livret [1] et [2].

Dans un contexte de raréfaction progressive des combustibles fossiles classiques (charbon, pétrole, gaz) et de recherche de ressources énergétiques durables, non productrices de gaz à effet de serre, l'énergie d'origine nucléaire demeure, au moins pour les cinquante prochaines années, une alternative crédible pour la production énergétique massive de base.

Les énergies renouvelables tels que l'hydraulique, la géothermie, le solaire, l'éolien ou encore la force des marées fournissent des compléments non négligeables et parfois indispensables, mais les puissances actuellement installées ou potentielles demeurent relativement faibles comparées aux autres sources. En outre, certaines d'entre elles dépendent de conditions que l'homme ne peut pas contrôler (alternance du jour et de la nuit ou conditions climatiques).

Dans un pays comme La France, ne disposant, en propre, d'aucune ressource fossile réellement économiquement exploitable, le recours au nucléaire apparaît comme la seule solution pour un approvisionnement en énergie susceptible de répondre aux besoins des citoyens, même en imaginant une politique d'économie d'énergie particulièrement vigoureuse, sans impact sensible sur l'économie du pays.

Pourtant, des accidents de Three Miles Island, Tchernobyl et, plus récemment, Fukushima, et surtout, le péché originel des bombes d'Hiroshima et Nagasaki, sans parler de la course aux armements nucléaires pendant les années de la guerre froide et de l'attitude de certains pays relativement aux armes de destruction massive, conduisent les opinions publiques à la plus grande méfiance vis-à-vis du nucléaire civil.

De plus, les sociologues s'accordent à dire que le nucléaire est anxiogène, principalement à cause des effets, souvent différés et irréversibles (cancers, en particulier), des radiations qu'on ne peut détecter sans l'aide d'appareils peu accessibles au grand public.

C'est en partant de la constatation qu'on craint un peu moins ce qu'on connaît un peu mieux, qu'à partir des divers matériaux que j'ai réunis pour mettre au point les conférences et les cours que je donne ici ou là, je me suis mis à écrire le petit livre que vous avez dans les mains.

J'espère sincèrement qu'il vous sera utile et vous poussera plus tard à approfondir les notions tout juste effleurées ci-après.

2

Qu'est-ce qu'un combustible nucléaire ?

2.1 Comment crée-t-on de l'énergie nucléaire ?

Une centrale nucléaire est une machine permettant de générer de la chaleur (énergie thermique) par transformation de l'énergie de fission générée dans le combustible constituant le cœur du réacteur.

Cette chaleur peut être utilisée pour divers objectifs moyennant l'usage d'échangeurs de divers types :

- Le chauffage urbain (énergie thermique),
- L'alimentation de turbines par de la vapeur d'eau afin d'obtenir de l'énergie électrique à partir de la rotation d'alternateurs (centrales nucléaires),
- La propulsion navale (énergie mécanique pour les sous-marins ou les porte-avions),
- Le dessalement de l'eau de mer, suivant divers procédés,
- La production d'hydrogène,
- ...

Mais qu'est-ce que l'énergie de fission ? C'est l'énergie que l'on récupère en cassant un gros noyau « fissile » avec un neutron. Au cours de cette réaction nucléaire, à partir du noyau fissile, on obtient deux noyaux plus petits et, pour la plupart, instables (radioactifs), les produits de fission, qui vont emporter, sous forme d'énergie cinétique (mouvement progressivement ralenti des ces noyaux au sein du combustible) la grande majorité (80 %, environ) de l'énergie de fission : la différence entre la somme des masses des noyaux des produits de fission (additionnée de celle des neutrons créés lors de la réaction) et celle du noyau fissile initial.

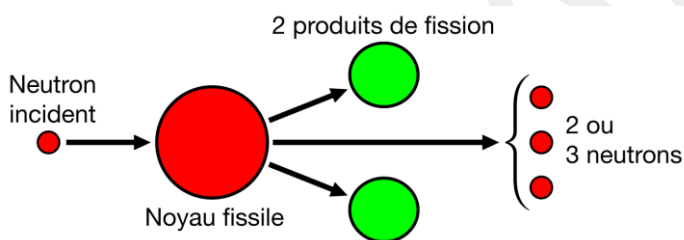


Fig 1 : Schématisation d'une réaction de fission

En effet, lors de la réaction nucléaire, outre les deux produits de fission, se créent aussi deux ou trois neutrons. Lavoisier a écrit que « rien ne se perd, rien ne se crée ». Quand on descend à une échelle aussi petite que celle du noyau, ce n'est plus tout à fait vrai. Contrairement aux réactions chimiques, on ne peut plus écrire que les masses se conservent lors d'une réaction nucléaire. Le défaut de masse, c'est l'énergie de fission, suivant la loi bien connue d'équivalence entre la masse et l'énergie d'Einstein :

$E = mC^2$, où C est la vitesse de la lumière dans le vide.

Pour chaque fission d'un noyau fissile, une énergie d'environ 200 MeV est créée (un mégaelectronvolt, noté MeV, est équivalent à l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré dans un champ électrique d'un million de volts).

Remarque pour les entomologistes : un moustique aurait besoin de l'équivalent de 50 000 fissions à peu près, en énergie mécanique, pour pouvoir voler !

Remarque pour ceux qui utilisent un fer à repasser : l'utilisation d'un fer à repasser pendant une heure consomme environ 1 kWh. Pour produire ce kWh en utilisant diverses sources d'énergie, il faut :

- pour l'énergie d'origine hydraulique : 10 tonnes d'eau,
- pour l'énergie d'origine thermique : 1 kg de pétrole,
- pour l'énergie d'origine nucléaire : 1mg d'uranium.

2.2 Fissile ou fertile

Mais alors qu'est-ce qu'un noyau fissile ? M. de la Palisse dirait que c'est un noyau qui peut être fissionné (autrement dit cassé) par un neutron dont l'énergie permet cette opération !

Disons, dans un premier temps, que les noyaux fissiles sont des « actinides », une famille d'éléments chimiques les plus lourds (le plus léger d'entre eux, qui donne le nom de la famille, étant l'actinium) de la classification périodique de Mendeleïev (figure 2)

Dans cette lignée de « Poids lourds, jumelle des lanthanides (famille du lanthane), la plupart des éléments ne se trouvent pas à l'état naturel.

Le tableau périodique des éléments chimiques est présenté avec les annotations suivantes :

- Numéro atomique** : Z
- Symbole atomique** : X
- Masses molaires atomiques (g.mol⁻¹)** : M
- Famille** : Indiquée par une lettre à droite du symbole atomique.
- Nom** : Indiqué en dessous du symbole atomique.

Le tableau est divisé en deux parties principales :

- Lanthanides** : Éléments 58 à 71, situés sous le tableau principal.
- Actinides** : Éléments 90 à 103, situés sous le tableau principal.

Les éléments sont classés par famille (groupes) et par période (lignes). Les familles sont indiquées par des lettres (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z) et les périodes par des chiffres (1 à 7).

Fig 2 : la classification de Mendeleïev et la famille des actinides

Seuls les éléments thorium et uranium se trouvent dans la croûte terrestre en quantités utilisables. A partir de l'élément neptunium, tous les actinides sont artificiels : ils ne peuvent être créés qu'à partir de réactions nucléaires (dans un réacteur, par exemple).

Remarque pour les puristes : on peut trouver de très faibles traces de plutonium dans la croûte terrestre ; il provient des effets du rayonnement cosmique. De même, dans les « Géantes Rouges », certains actinides sont produits de façon naturelle.

Comme la presque totalité des éléments chimiques, chaque actinide a des isotopes : des petits frères chimiquement identiques (même nombre d'électrons autour du noyau et donc de protons dans le noyau, pour conserver la neutralité électrique), dont seul le noyau diffère par le nombre de neutrons.

Par exemple, pour l'hydrogène, le premier élément de la classification (en haut, à gauche dans la figure 2), la majorité des isotopes naturels est constituée d'un proton, le noyau, autour duquel gravite un électron, qui lui donne sa « signature » chimique. Mais, dans l'eau, on trouve aussi une très faible proportion d'un élément, appelé « deutérium », constitué d'un électron gravitant autour d'un noyau constitué d'un proton et d'un neutron. Lorsqu'on augmente artificiellement la proportion de deutérium dans l'eau naturelle, on obtient de « l'eau lourde » (le film intitulé « La bataille de l'eau lourde » retrace la lutte entre les nazis et les alliés pour la possession du stock d'eau lourde fabriqué en Norvège), un « modérateur » (ralentisseur de neutrons) utilisé dans les réacteurs d'une filière appelée CANDU. Encore plus fort : dans les réacteurs nucléaires se forme un troisième isotope de l'hydrogène, instable et donc radioactif (c'est un émetteur de particules β), appelé le « tritium ». Cet isotope a toujours un unique électron, la signature chimique de l'hydrogène, mais il gravite autour d'un noyau constitué d'un proton et de deux neutrons.

Remarque pour ne pas se tromper : le terme de « modérateur », dans notre contexte, n'est pas la personne chargée de calmer les discussions trop animées en cours de réunion. Il s'agit d'un matériau, formé de noyaux légers, qui ralentit les neutrons par diffusion élastique. Dans un réacteur nucléaire à neutrons « thermiques » (ou lents), le modérateur permet d'ajuster l'énergie des neutrons et d'augmenter leur probabilité d'interagir avec les noyaux lourds pour générer les réactions de fission.

Dans le minerai d'uranium naturel, à une exception près, on trouve majoritairement (99,28 %) l'isotope ^{238}U (avec 92 protons et 146 neutrons) et un faible pourcentage (0,718 %) de l'isotope ^{235}U (toujours 92 protons, mais seulement 143 neutrons). Seul ce dernier est fissile : le premier est dit « fertile ». L'exception est dans le minerai d'Oklo, au Gabon, découverte, en France, par F. Perrin en 1972 : la proportion de l'isotope ^{235}U y est légèrement plus faible que dans les autres minerais. Cette mine, dans les temps géologiques, a fonctionné comme un réacteur nucléaire naturel et s'est appauvri en isotope fissile.

Pourquoi certains isotopes d'actinides sont-ils appelés fissiles et d'autres fertiles ? Cela tient à une caractéristique propre à chacun des isotopes ou, plus exactement, à leur noyau : la section efficace. Pour simplifier, cette caractéristique, que l'on exprime en « barns » (unité équivalente à 10^{-24} cm^2), est équivalente à la surface apparente que représente un noyau donné pour un neutron venant le heurter avec une énergie donnée. On distingue la section efficace de fission et celle de capture. Lorsque qu'un neutron d'énergie E vient heurter un noyau, si sa section efficace de fission, pour l'énergie E , est plus élevée que celle de capture, le noyau fissionne. Dans le cas inverse, le noyau capture le neutron et « l'ingère » temporairement. Lorsque la section efficace de fission d'un isotope est supérieure à celle de capture sur la majorité de la plage d'énergie du neutron incident dans le spectre énergétique des réacteurs nucléaires, l'isotope est considéré comme fissile et il est fertile dans le cas inverse. C'est ce que montre la figure suivante pour le ^{239}Pu (fissile).

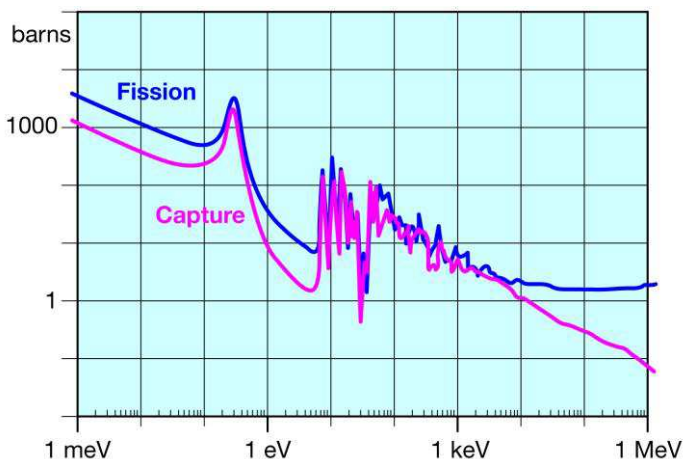


Fig 3 : Sections efficaces de fission et de capture du ^{239}Pu

Pour simplifier, dans les actinides, les isotopes ayant un nombre de nucléons (protons + neutrons) :

– impair sont fissiles :

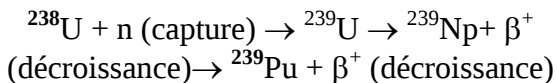
- pour l'uranium : 233 et 235 (pas sur toute la gamme d'énergie du neutron incident),
- pour le plutonium : 239 et 241,
- pour le neptunium : 237,
- pour l'américium : 241,
- pour le curium : 245.

– pair sont fertiles :

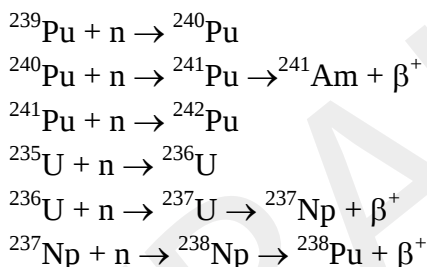
- pour le thorium : 232,
- pour l'uranium : 238,
- pour le plutonium : 238, 240 et 242.

Les cinq isotopes du plutonium (de 238 à 242) peuvent être créés par captures successives d'un neutron, à partir de l'isotope fertile ^{238}U ou de l'isotope ^{235}U , fertile dans un domaine d'énergie donnée du neutron incident, puis décroissance β

(émission d'un électron positif par transformation d'un proton en un neutron + un électron positif, le nombre total de nucléons dans le noyau restant identique), par exemple :



Et ainsi de suite :



2.3 Pour résumer (et expliquer certains phénomènes)

Le combustible nucléaire peut se définir comme le matériau qui contient les noyaux d'actinides fissiles à l'origine des réactions de fission. On verra que ce matériau peut-être sous diverses formes (métal pur, alliages métalliques, céramiques diverses – oxyde, carbure, nitrure, mélanges de céramique et de métal, mélanges de plusieurs céramiques, voire liquide, dans le cas, très particulier, des réacteurs à sels fondus).

Ce matériau est enfermé dans un conteneur étanche, souvent appelé la gaine du combustible. Elle constitue la première des trois barrières indépendantes, base du principe de « défense en profondeur », notion fondamentale de la sûreté en

matière nucléaire. Nous aurons l'occasion d'en reparler plus tard.

Pour l'instant, retenons le principe de la fission : casser un gros noyau d'actinide fissile pour récupérer de l'énergie, deux produits de fission et 2 ou 3 neutrons, dont on ne conservera qu'un seul, pour entretenir les fissions suivantes.

Les produits de fission sont instables et radioactifs : ils décroissent en émettant un rayonnement, donc de l'énergie pendant le temps de leur décroissance. Dans un réacteur nucléaire mis à l'arrêt après avoir fonctionné, quand on a fait « chuter les barres » d'absorbant destinées à « manger » les neutrons, les produits de fission continuent à émettre de l'énergie qu'il faut évacuer jusqu'à ce que le combustible ait atteint un niveau de température tel que la gaine puisse le supporter sans dommage. Lors d'arrêts intempestifs, l'exploitant doit pouvoir continuer à refroidir le combustible, ce qui, dans le cas du très fort tremblement de terre récent suivi d'un tsunami au Japon, n'a pas été possible à Fukushima (perte de l'alimentation électrique et destruction des systèmes de refroidissement prévus à cet effet lors de la conception des réacteurs).

De plus, les isotopes de certains produits de fission (le xénon en particulier) sont « neutrophages ». Lorsqu'on arrête le réacteur, ils s'accumulent dans le combustible et il faut attendre qu'ils aient disparu (décru) pour pouvoir redémarrer (c'est ce que l'on appelle, en termes de métier, « l'empoisonnement au xénon »).

On constate donc qu'un réacteur n'est pas une machine de type « Stop an Go », il ne s'arrête, ni ne redémarre, comme un moteur de voiture et, du fait de cette « inertie », son utilisation en est plus délicate.