

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
Filière Sciences de la matière physique (SMP)
Parcours : 2
Projet de Fin d'Etudes

**La production d'énergie thermique à partir des
différents types des réacteurs nucléaires.**

Réalisé par

AMRANI ABDESSAMAD

KHOUZAIMA ABDELKARIM

Soutenu le 8 /7 /2015

Sous la direction du Pr : OUDRHIRI HASSANE

Membres du Jury :

- M.BOUKALOUCHE : professeur dans la faculté des sciences-Rabat**
- N.HASSANAIN : professeur dans la faculté des sciences-Rabat**
- H.OUDRHIRI : professeur dans la faculté des sciences-Rabat**

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail :

*A nos très chers parents qui ont toujours été là
pour nous, qui nous ont été d'un soutien moral
incontestable et nous ont servi de modèle par leur*

dévouement à notre éducation.

*A tous les enseignants, qui ont éclairci notre
chemin.*

*A tous les scientifiques, qui ont changé notre
perception du monde.*

Remerciements

Avant d'entamer ce travail, nous profitons de l'occasion pour remercier tout d'abord notre professeur Monsieur H.OUDRHIRI enseignant à la faculté des sciences de Rabat, pour nous avoir donné l'opportunité de participer à ce projet et d'avoir accepté d'être notre encadrant. Ses remarques pertinentes, ses précieuses directives ainsi que son suivi constant nous ont été d'une immense aide pour la réalisation de ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer nos vifs remerciements aux membres de Jury Messieurs les professeurs HASSANAIN et BOUKALOUCH , qui ont bien voulu accepté d'enrichir ce travail par leur jugement en tant que jury.

Afin de n'oublier personne, nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à achever ce modeste travail.

Sommaire

CHAPITRE I

-Partie A

1-

INTROUDUCTION GENERAL	5
-----------------------	---

1.1 Définition de l'énergie nucléaire	5
---------------------------------------	---

1.2 Les applications des réactions nucléaires	5
---	---

-Partie B

1.1Radioactivité	6
------------------	---

1.2 Fission nucléaire	6
-----------------------	---

1.2.1Réaction en chaîne	8
-------------------------	---

1.3Capture neutronique	9
------------------------	---

1.4 La fusion nucléaire	9
-------------------------	---

1.5.1 Combustible nucléaire	10
-----------------------------	----

1.5.2 Cycle Combustible	11
-------------------------	----

1.5.3 Caractéristiques de l'uranium 235	11
---	----

1.5.4 Méthodes d'extractiond'uranium	12
--------------------------------------	----

1.5.5 La Conversion de l'uranium	12
----------------------------------	----

1.5.6Fabrication du combustible	13
---------------------------------	----

CHAPITRE II

1. Centrale nucléaire	14
-----------------------	----

2.1 Principe de fonctionnement	14
--------------------------------	----

2.2 Les barres de commande	15
----------------------------	----

2.3Matière fissile	15
--------------------	----

2.4 Le modérateur	16
-------------------	----

2.5Le caloporteur	17
-------------------	----

3.LESDIFFERENTS TYPES DES REACTEURS	17
-------------------------------------	----

3.1Le réacteur à eau pressurisée (REP)	18
--	----

3.1.1Le Cœur	19
--------------	----

3.1.2Le circuit primaire	19
--------------------------	----

3.1.3Le circuit secondaire	19
----------------------------	----

3.1.4Les principaux circuits auxiliaires	20
--	----

3.1.5 Les circuits de sauvegarde	20
3.1.6 L'enceinte de confinement	20
3.1.7 Les systèmes supports	21
3.2 LE REACTEUR A EAU BOUILLANTE	22
3.3 Le REACTEUR A NEUTRON RAPIDE	24
a- Le réacteur à haute température refroidi au gaz (Hélium) :	25
b- Les réacteurs rapides refroidis au Sodium	25
c- Les réacteurs rapides refroidis au Plomb	26
4 Les générations de réacteurs nucléaires	27
Chapitre III	
3.1 Description de la technique de production de l'énergie	28
3.2 Les avantages et caractéristique de l'énergie nucléaire	32
3.3 Les inconvénients de l'énergie nucléaire	32
- Conclusion	34
Bibliographie	36

CHAPITRE I

Partie A

1- INTRODUCTION GENERALE

1-1 Définition de l'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est produite par les noyaux des atomes qui subissent des transformations, ce sont les réactions nucléaires. Ces réarrangements nucléaires conduisent à des configurations plus stable, le différentiel d'énergie constitue alors l'énergie libérée par la réaction.

Selon le contexte d'usage, le terme d'énergie nucléaire recouvre deux sens différents :

Au niveau microscopique

- l'énergie nucléaire à la force de cohésions des nucléons.
- la force nucléaire forte (protons et neutrons) au sein du noyau des atomes.
- Les transformations du noyau libérant cette énergie sont appelées réactions nucléaires.
- La force nucléaire faible, elle régit les réactions entre particules et neutrinos.

Au niveau macroscopique, l'énergie nucléaire correspond, d'une part à l'énergie libérée par les réactions de fusion nucléaire au sein des étoiles, d'autre part aux usages civils et militaires de l'énergie libérée lors des réactions de fission ou de fusion du noyau atomique.[18]

1-2 Les applications des réactions nucléaires

Les applications des réactions nucléaires s'appuient sur l'énergie libérée sous forme de chaleur.

Parmi ses applications:

- la production de l'électricité.
- La production de neutrons utilisés pour la recherche et en médecine.

Partie B

1.1 Radioactivité

La radioactivité est un phénomène physique naturel au duquel des noyaux atomiques instables se désintègrent en engageant de l'énergie sous forme de rayonnements divers, pour se transmuter en des noyaux atomiques plus stables. Ainsi les rayonnements émis sont, selon les cas, des rayons. Cette énergie libérée a été exploitée dans le domaine militaire mais également pour usages civils (pour produire de la chaleur) .pour cela on doit faire appel à des également radioactifs notamment l'uranium naturel, une ressource extrêmement rare et précieuse, comme combustible nucléaire.

-L'unité de la radioactivité est le becquerel (Bq)

1Bq =1 désintégration d'atome par seconde. [4]

1.2 La fission nucléaire

La fission nucléaire est le phénomène par lequel un noyau lourd et instable éclate en deux noyaux plus légers et quelques particules tout en dégageant énormément de chaleur . Lorsque cet éclatement se fait grâce au bombardement du noyau lourd par une particule, la fission est dite induite.

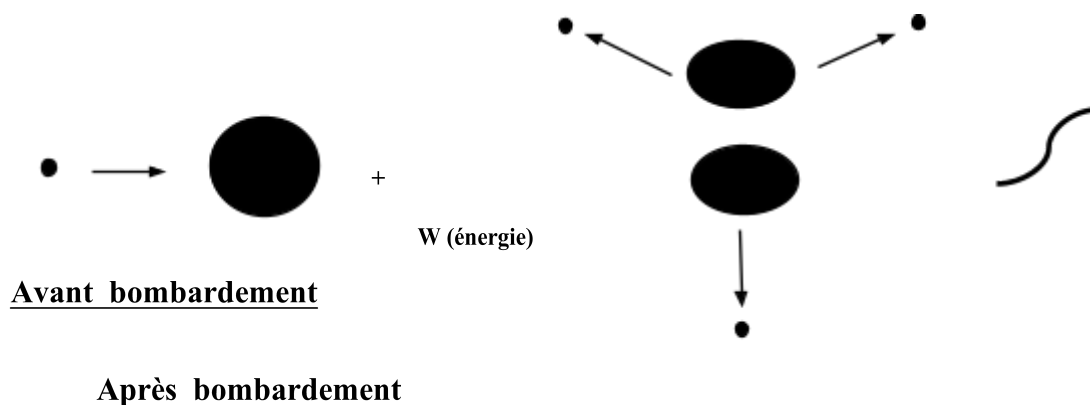


Fig 1: Fission nucléaire

Le phénomène de fission nucléaire induite a été décrit pour la 1^{ère} fois en décembre 1938 par les chimistes allemands Otto Hahn et Fritz Strassmann. Niels Bohr, Lise Meitner et Otto Frisch ont ensuite émis l'hypothèse selon laquelle l'absorption d'un neutron par un noyau d'uranium provoque parfois la scission de celui-ci en deux parties approximativement égales, ainsi que la libération d'une

énorme quantité d'énergie : ils nomment ce phénomène « fission nucléaire ». Ils ont ensuite prouvé que le bombardement de l'uranium par des neutrons produit un isotope du baryum. [4]

Certains atomes sont aussi susceptibles de fissionner sous l'effet d'un bombardement de neutrons de toutes énergies (neutrons rapides, ou bien neutrons lents, dits "thermiques") : on parle alors d'atomes fissiles. Le seul isotope fissile naturel est l'uranium 235.

Il existe par ailleurs deux types de fission nucléaire : La fission spontanée et la fission induite. [4]

a- La fission spontanée se produit lorsque le noyau se désintègre en plusieurs fragments sans absorption d'une particule matérielle :

Ce type de fission se fait naturellement sans bombardement neutroniques.

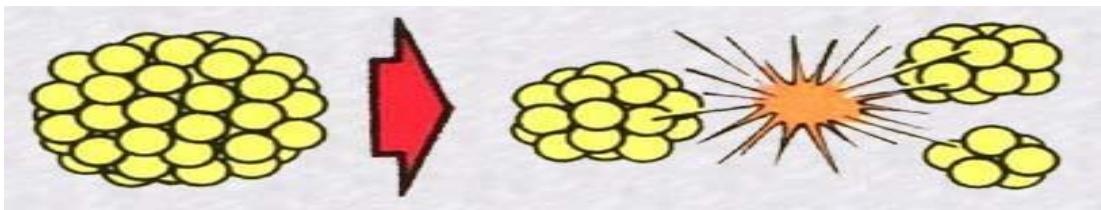


Fig 2: Fission spontanée

b-La fission induite se produit lorsqu'un noyau lourd capture une autre particule, qui peut être un neutron afin de se décomposer en d'autres éléments. La figure ci-dessous (Fig 3) montre le phénomène de fission induite :

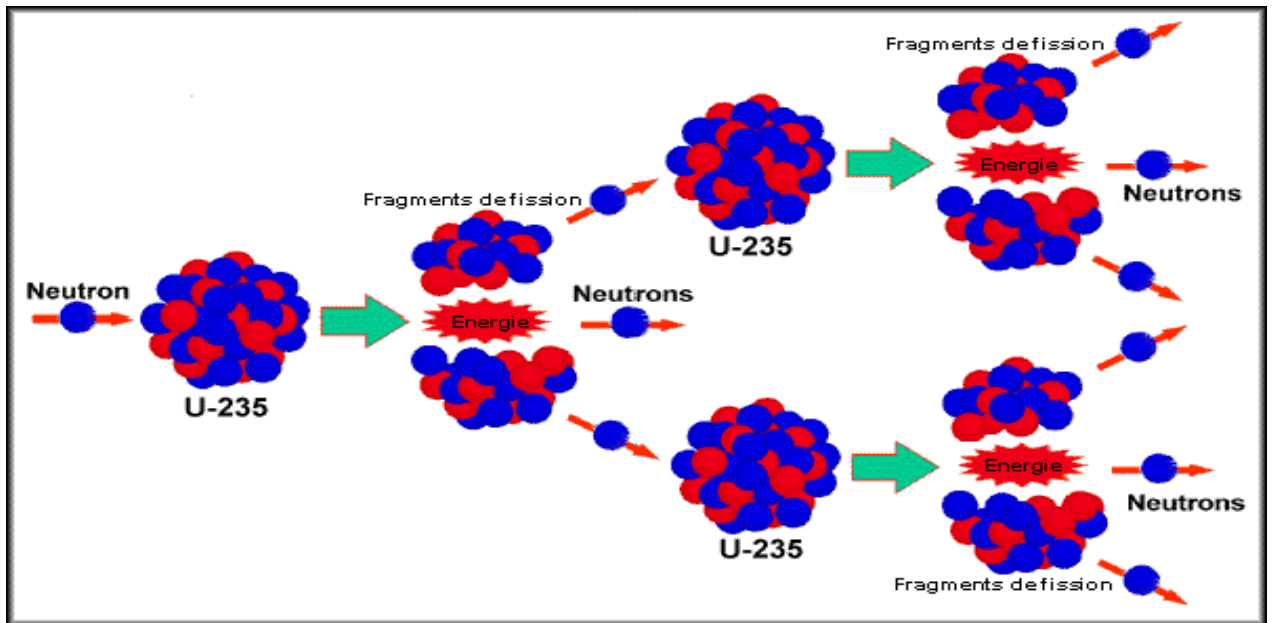
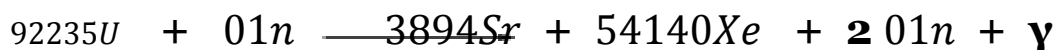


Fig 3 : Fission induite

Certains radionucléides ont la particularité de pouvoir subir une réaction de fission nucléaire sous l'effet d'un bombardement de neutrons de haute énergie: ce sont des atomes fissibles ; il s'agit de certains atomes lourds, notamment l'uranium 235, l'uranium 238 et tous les isotopes du plutonium.

Dans une telle réaction de fission nucléaire, le noyau de l'atome se divise en plusieurs nucléides plus légers.

L'équation de la fission nucléaire s'écrit de la façon suivante :



Dans cette équation, le bombardement neutronique d'un noyau d'uranium 235 décompose celui-ci en 2 noyaux distincts. En général les produits de fission sont deux noyaux lourds, généralement radioactifs et des neutrons en plus d'un dégagement énorme d'énergie (de l'ordre de 200 MeV). Les nucléides plus légers ainsi produits (en général, 2 par réaction de fission) sont appelés produits de fission. Ils sont composés de protons et de neutrons initialement présents dans l'atome fissible, mais la répartition de ces nucléons entre les produits de fission n'est pas déterminable. Un même atome fissible peut produire une multitude de couples de produits de fission. Ce qu'on appelle réaction en chaîne.[4]

1.2.1 REACTION EN CHAÎNE

Les réacteurs électronucléaires ont pour but de provoquer une réaction en chaîne contrôlée, avec un facteur de multiplication des neutrons égal à 1. Cette réaction doit être contrôlée pour ne pas s'emballer. Un réacteur classique fonctionne en régime critique les combustibles utilisés (certains sont fissiles quand d'autres absorbent les neutrons) permettent qu'un seul des neutrons libérés à chaque fission provoque une nouvelle fission. Dans un réacteur, les combustibles sont choisis de manière à ce que moins d'un neutron par fission induise une nouvelle fission. Un tel réacteur ne peut donc maintenir la réaction en chaîne par lui-même. Il doit être alimenté en neutrons par une source externe, ce qui minimise le risque potentiel d'accident d'emballement.[4]

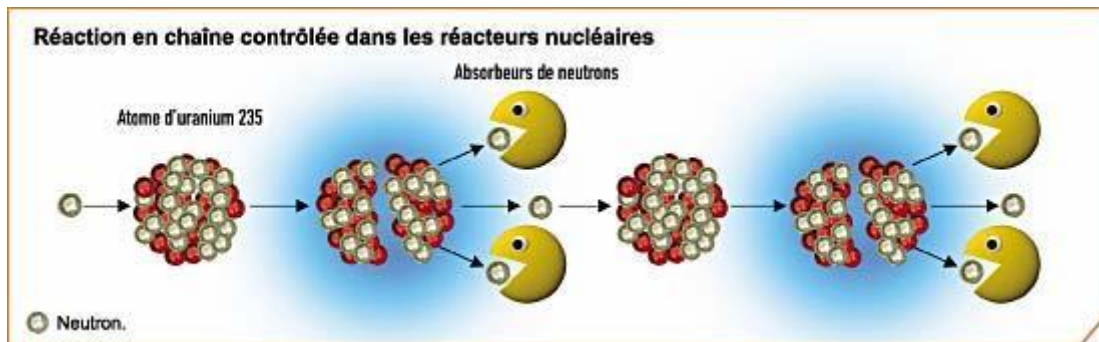


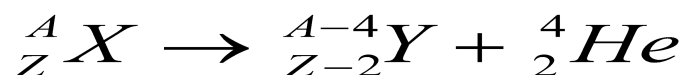
fig4 :Réaction en chaîne contrôlée

1.3 CAPTURE NEUTRONIQUE

Les neutrons peuvent être capturés par des absorbants neutroniques, placés à cet effet pour contrôler la criticité de la réaction.

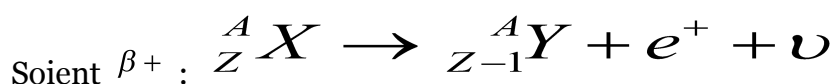
D'autres atomes peuvent aussi capturer des neutrons environnants ; les atomes ainsi formés peuvent alors être instables et décroître par :

Radioactivité Alpha :

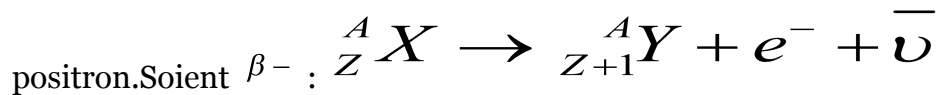


Ca ne concerne que les noyaux très lourds ($Z > 82$) c'est le cas de l'uranium.

Radioactivité Béta :



Et qui consiste en la transformation d'un proton en un neutron avec émission d'un



Du fait que ses noyaux ont un excès en Neutrons, ils doivent transformer un neutron en un proton.

C'est notamment le cas de l'uranium, qui, en absorbant un neutron, peut ne pas fissionner mais devenir alors du plutonium (ex : l'Uranium 238 peut absorber un neutron et devenir Uranium 239, puis subir deux désintégrations bêta pour devenir du Plutonium 239). Le plutonium aussi peut absorber un neutron, etc. C'est ce qui explique, dans les réactions ayant lieu dans les centrales nucléaires, la formation de plutonium et d'actinides mineurs transuraniens (autres radionucléides, encore plus lourds que le plutonium), radioactifs avec de très longues demi-vie.

Enfin, certains atomes peuvent devenir un isotope fissile suite à une capture d'un neutron : ils sont alors dits fertiles. C'est ainsi que le Plutonium 239 (fissile) peut être produit à partir de l'Uranium 238 (fertile), et peut ainsi participer à la réalisation des réactions de fission nucléaire dans un réacteur.

La fission nucléaire est bipartition d'un noyau instable en deux noyaux plus légers et quelques particules élémentaires (neutrons). Cette bipartition s'accompagne d'un dégagement de chaleur, c'est à dire d'énergie.

La fission spontanée existe mais elle est très rare. Le seul élément naturellement fissile est l'uranium 235. Sous l'impact d'un neutron, le noyau se trouve déséquilibré et se transforme en deux noyaux plus légers mais toujours instables appelés produits de fission. Au moment du choc avec le neutron, ces produits de fission sont éjectés à grande vitesse. Les noyaux issus de fission sont dans la plupart des cas radioactifs mais leur période est assez courte. La fission dégage une énergie gigantesque. Un gramme d'uranium 235 libère ainsi autant d'énergie que la combustion de plusieurs tonnes de charbon. Les neutrons libérés par la fission ont une très grande énergie. Si on parvient à les ralentir convenablement, ils peuvent induire de nouvelles fissions et la réaction continue et s'accélère. Dans les réacteurs nucléaires, la réaction s'auto-entretient. Mais, si on laisse augmenter le nombre de neutrons présents, la réaction peut devenir explosive, c'est le cas de la bombe atomique (bombe A). [12]

1.4 La fusion nucléaire

Il arrive également que deux ou plusieurs noyaux atomiques légers s'unissent pour former un noyau lourd. On dit alors qu'il y a fusion nucléaire.

La fusion nucléaire est plus difficile à réaliser que la fission car ici, il faut rapprocher des atomes si près l'un de l'autre qu'ils vont se coller. Pour cela, il est nécessaire de porter la matière à une très haute température (environ 100 millions de degrés), sous une très forte

pression. L'énergie libérée par ce phénomène est dix fois supérieure à celle libérée lors de la fission. D'autre part, la fusion nucléaire ne produit pas de déchets radioactifs puisque les produits de fusion sont stables.

La fusion est aussi exploitée dans la bombe thermonucléaire (bombe H) pour laquelle les bombes A servent d'allumettes car leur explosion permet d'atteindre les températures nécessaires au déclenchement de la fusion. [12]

1.5.1 Combustible nucléaire

Les principaux atomes fissiles sont l'uranium 233, l'uranium 235, le plutonium 239 et le plutonium 241. Seul l'uranium 235 se trouve à l'état naturel. C'est donc le plus souvent lui qui est utilisé comme combustible dans les centrales nucléaires.

Le combustible nucléaire fournit beaucoup plus d'énergie qu'un combustible fossile (charbon ou pétroles) Utilisé dans un réacteur thermique,

Un kilo d'uranium produit 10^6 fois plus d'énergies qu'un kilo de charbon ou pétrole dans une centrale thermique, et le combustible restera plusieurs années dans le réacteur, contrairement aux combustibles classiques qui sont brûlés rapidement. Pour devenir un combustible nucléaire, l'uranium doit subir de nombreuses opérations : c'est le cycle combustible. [5]

1.5.2 Cycle combustible

Le cycle combustible est une chaîne de processus qui commence de l'extraction de l'uranium, pour fabriquer des combustibles nucléaires utilisables dans des réacteurs nucléaires, et qui se termine par la gestion du combustible usé après sa sortie des réacteurs.

Le cycle ouvert consiste à stocker directement le combustible usé sans le retraiter, tandis que le cycle fermé est choisi pour le recycler, afin de récupérer un combustible réutilisé et pour réduire au minimum la radio toxicité des déchets à long terme. [4]

1.5.3 Caractéristiques de l'uranium 235

L'uranium naturel, sous forme de minerai, est un mélange de deux isotopes : l'uranium 238, le plus abondant, et l'uranium 235, sous forme de traces. Et ce dernier qui subit la fission nucléaire. La combustion d'une pastille d'uranium de 7 grammes par exemple peut libérer autant d'énergie qu'un tonne de charbon. Le cœur d'un réacteur nucléaire, contient plusieurs millions de pastilles, chacune va y séjourner pendant trois ou quatre ans. Des transformations s'opèrent pendant cette période : consommation progressive de l'uranium 235 et apparition de

produits de fission. Au bout d'un certain temps, le combustible doit donc être retiré du réacteur et renouvelé. [4]

1.5.4 Méthodes d'extraction d'uranium

L'extraction d'uranium examinée à ciel ouvert est extraite de la roche hôte sans qu'il soit nécessaire d'excaver et de traiter le minerai, afin d'éviter la production de résidus.

--L'extraction à ciel ouvert implique d'extraire le minerai directement après le décapage de la partie de la roche qui le recouvre pour accéder aux dépôts d'uranium. Il s'agit de la méthode la plus couramment utilisée pour extraire des corps de minerai qui se trouvent soit en surface, soit relativement proches de la surface. Plus la profondeur à laquelle se situe le dépôt est grande, et plus la taille et le coût de l'exploitation augmentent, de même que la quantité de roches stériles générée. Les opérations d'extraction à ciel ouvert se caractérisent par un ratio élevé de stériles sur minerai et ont donc le plus fort impact en surface. [4]

1.5.5 La Conversion de l'uranium

La conversion consiste à transformer l'uranium issu des mines pour qu'il puisse être mis en œuvre à l'état gazeux dans les usines d'enrichissement. Cette transformation se fait en deux étapes :

1^{er} étape tétrafluorure d'uranium (UF_4).

2^{ème} étape procédé de fluoration permet de passer du tétrafluorure à l'hexafluorure d'uranium. L' UF_6 ainsi produit est alors expédié vers les usines d'enrichissement,

-La majeure partie de l'uranium produit dans le monde vient actuellement du :

- le Kazakhstan (12% des réserves mondiales) ;
- le Canada (9%) ;
- la Russie (9%) ;
- le Niger (8%) ;
- l'Afrique du Sud (5%) ;
- le Brésil (5%) ;

1.5.6 Les types du combustible

Il existe deux types de combustible fabriqué utilisée dans la centrale nucléaire :

- Le combustible UO_2 (oxyde d'uranium)

L'hexafluorure d'uranium enrichi est transformé en poudre d'oxyde d'uranium puis compacté sous forme de pastilles. Les pastilles sont introduites dans les gaines métalliques, assurant leur maintien, pour constituer les assemblages combustibles.

- Le combustible MOX (oxyde mixte d'uranium et de plutonium)

Est un mélange de poudre d'oxyde d'uranium et de poudre d'oxyde de plutonium. L'uranium utilisé dans la fabrication du combustible MOX est de l'uranium appauvri. Le plutonium est issu du traitement des combustibles usés en France à l'usine AREVA de La Hague. [4]

CHAPITRE II

1. Centrale nucléaire

Une centrale nucléaire contient un ou plusieurs réacteurs nucléaires, lieu de production de l'énergie, sous forme de chaleur, et un ensemble de systèmes assurant la conversion de cette chaleur en électricité.

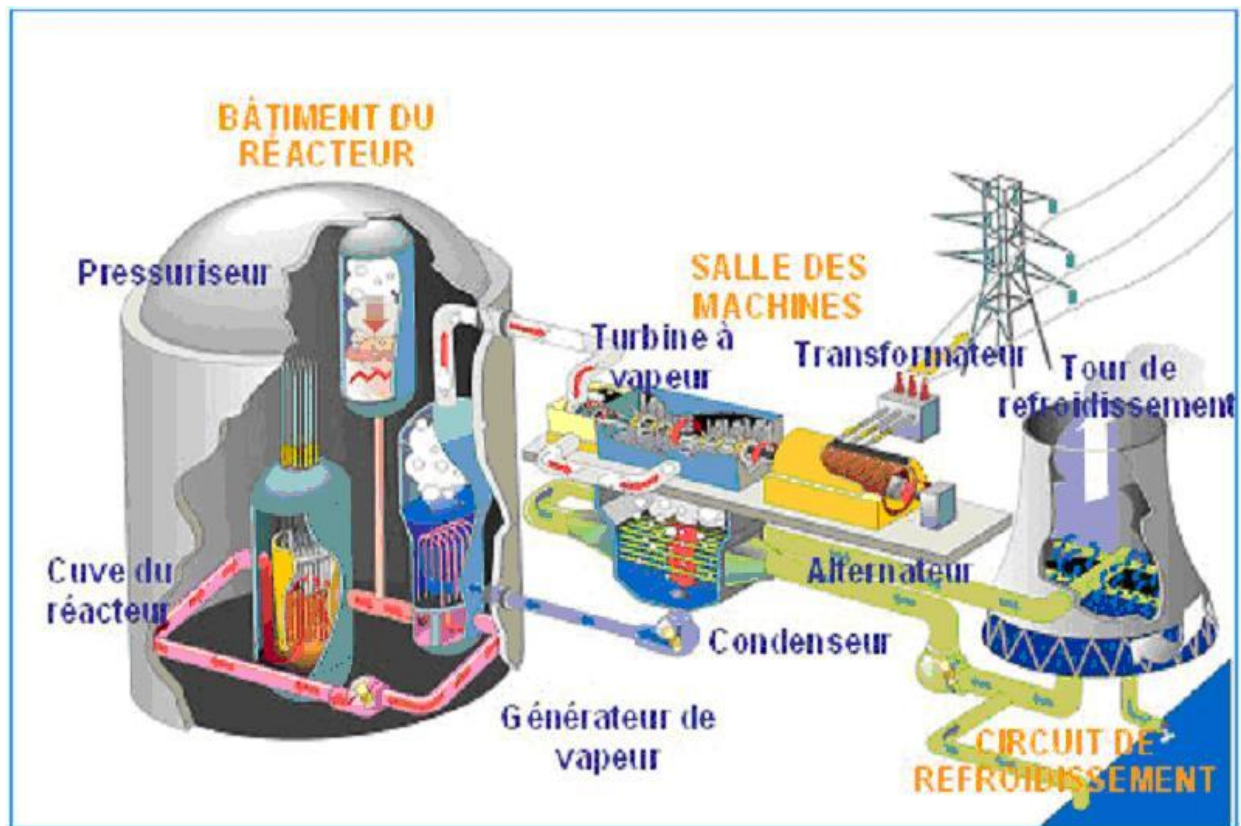


Fig 5: schéma d'un réacteur nucléaire

2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire est le même que celui utilisé dans les centrales thermiques classiques fonctionnant avec de fossile (charbon, pétrole ou gaz...) la seule différence c'est que le combustible utilisé comme source de chaleur est constitué par

l'uranium qui se trouve dans le cœur du réacteur où se déroule la réaction de fission de l'uranium.

Dans un réacteur, un *combustible* subit une réaction en chaîne contrôlée, de fission nucléaire. La chaleur dégagée y est transportée grâce à un "fluide caloporteur". La réaction est contrôlée par des absorbants neutroniques (bore, gadolinium, cadmium...) présents dans les barres de contrôle ou dans le fluide caloporteur.

Le cœur d'un réacteur nucléaire est un massif de quelques mètres cubes contenant la matière fissile (l'uranium) au sein des structures qui en assure le bon fonctionnement : gainage des éléments de combustible pour confiner les produits radioactifs , fluide « modérateur » pour ralentir les neutrons et « caloporteur » circulant entre ces éléments pour emporter vers l'extérieur la chaleur produite par les fissions et éléments de commande destinée à réguler et contrôler la réaction en chaîne.[6]

2.2 Les barres de commande

la puissance du réacteur est maîtrisée par les barres de commande qui pénètrent dans le cœur ainsi que par la variation de la teneur en acide borique (absorbeur de neutrons) de l'eau du circuit primaire. Les barres de commande permettent de démarrer et d'arrêter le réacteur et de suivre la variation de charge. Leur chute par gravité p

Permet l'arrêt automatique du réacteur. La concentration en acide borique est ajustée en fonction de l'épuisement progressif du combustible en matériau fiss

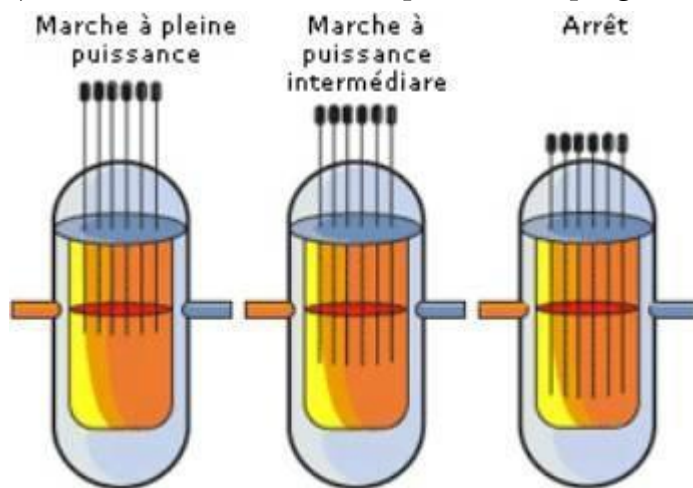


fig 6 : schéma des barres de commande

Les éléments destinés à contrôler la réaction en chaîne sont principalement constitués de matériaux tels le Bore ou le Cadmium, capturant sans fissions les neutrons, en les introduisant progressivement. L'opérateur augmente la proportion des neutrons perdus, ce qui réduit le rythme de la réaction en chaîne, inversement en les extrayant, il laisse davantage de neutrons disponibles pour les fissions et il relance la réaction nucléaire.[1]

2.3 Matière fissile :

On appelle matière fissile une matière dont les noyaux subissent facilement la fission par les neutrons qui est utilisée comme combustible dans les réacteurs. L'isotope 235 de l'Uranium est la seule matière naturelle. Mais l'Uranium 235 ne représente plus actuellement que 0.7% de l'Uranium naturel, ce qui laisse peu d'espoir de réaliser une réaction en chaîne auto-entretenue. Les physiciens ont cependant trouvé la parade par trois voies possibles. Le premier est la séparation isotopique de l'uranium, la deuxième voie passe par la fabrication de matières fissiles artificielles telles que le plutonium, enfin la troisième voie est la thermalisation des neutrons qui passe par l'utilisation d'un modérateur.[1]

2.4 Le Modérateur

La présence d'un modérateur est nécessaire. Pour que la réaction en chaîne ait un rendement efficace, Le modérateur ralentit la vitesse des neutrons, permettant ainsi une réaction nucléaire en chaîne . L'élément retenu comme modérateur sont l'eau (ordinaire, lourde) [1]

L'eau ordinaire est le modérateur le plus utilisés; la capture des neutrons par l'hydrogène ordinaire n'est pas négligeable et ce modérateur ne permet pas d'utiliser l'uranium naturel : il faut enrichir l'uranium à une teneur d'au moins quelques pour cent en uranium 235. Les autres modérateurs cités, permettent l'utilisation de l'uranium naturel ; le meilleur modérateur, mais le plus coûteux, est l'eau lourde. La probabilité d'interaction d'un neutron avec la matière est définie à partir de la section efficace macroscopique[17] :

$$\frac{-d\Phi_{\text{total}}}{\Phi} = \sum_{i, \alpha} \frac{-d\Phi_{\alpha}^i}{\Phi} = \sum \sigma_{\alpha}^i \cdot N_i \cdot dx$$

Avec :

N_i : est la densité volumique des noyaux de type i ,

σ_i : est la section efficace microscopique d'interaction des noyaux de type i .

Dans un Réacteur A Eau Pressurisée, les principaux noyaux présents sont H, O, U, Zr, Br et Produits de fission. Les principales réactions possibles dans un réacteur

Sont :

***Fission** : Absorption par un noyau lourd fissile,

***Capture** : Absorption par un noyau non fissile,

***Diffusion** : Choc élastique avec transfert d'énergie (ralentissement). [17]

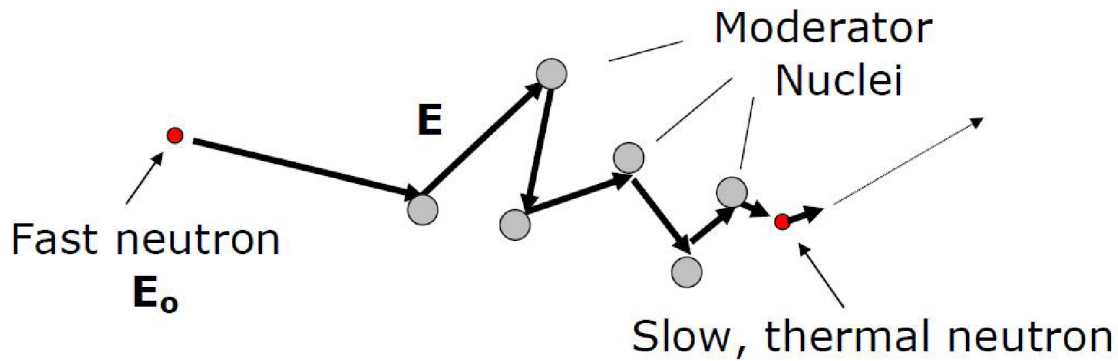


Fig 7: Principe du ralentissement des neutrons

2.5 Le Caloporteur

Un caloporteur est un fluide chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Chaque fluide caloporteur est choisi en fonction de ses propriétés physico-chimiques, comme la viscosité, la capacité thermique volumique, la chaleur latente de vaporisation (ou de liquéfaction) en cas de changement de phase,. Dans le cas des centrales nucléaires, le choix du fluide fait aussi intervenir son comportement face aux rayonnements neutroniques.[1]

3. LES DIFFERENTS TYPES DES REACTEURS

Les réacteurs se classent, en premier lieu, d'après leur objectif : soit la production d'électricité, pour la défense nationale, production de flux intenses de neutrons pour des essais techniques ou pour la recherche fondamentale, étude de caractéristiques neutroniques avec des maquettes critiques de puissance négligeable, etc. Alors que les premiers réacteurs ont pu être construits pour des objectifs multiples, la recherche de performances poussées a ensuite généralement imposé la spécialisation.[2]

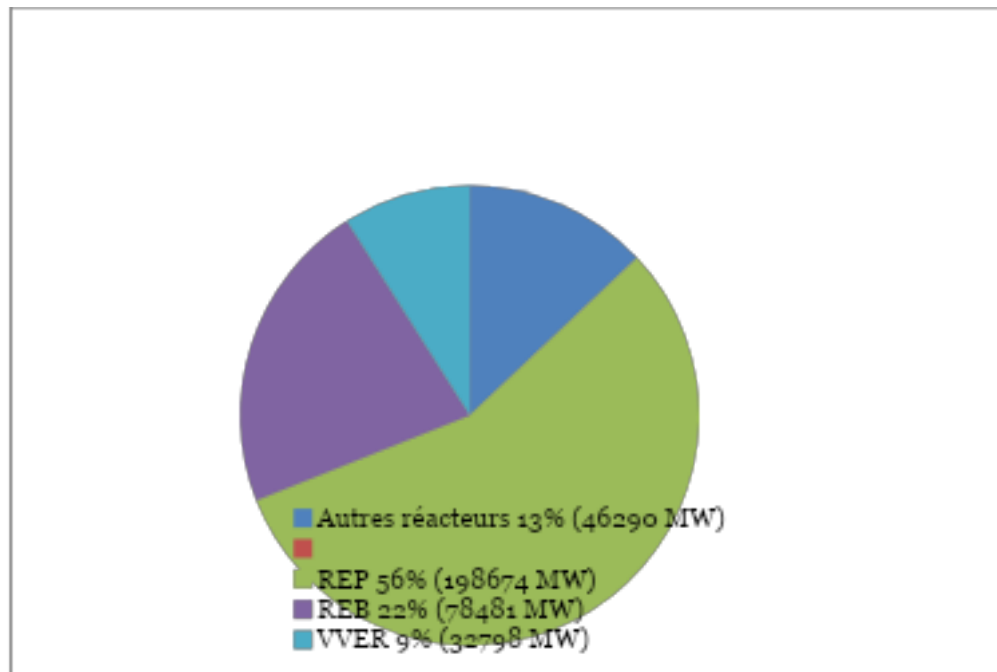
Pour la production d'électricité, quatre types seulement ont connu un réel développement industriel :

- Les réacteurs modérés au graphite et refroidis par un gaz ont été les premiers construits en Europe.
- Les réacteurs modérés à l'eau lourde ont été construits dans de nombreux pays, mais il n'y a vraiment qu'au Canada qu'ils aient été développés en série

– Les réacteurs à eau ordinaire constituent de la filière la plus importante et représentent la majeure partie de l'équipement électronucléaire mondial (plus de 85% en nombre et en puissance installée). Il en existe trois types : les réacteurs à eau sous pression (R.E.P, ou P.W.R), les réacteurs à eau bouillante (REB), enfin les réacteurs modérés au graphite et refroidis à l'eau ordinaire.

On s'intéressera plus particulièrement aux filières de réacteurs à Eau, qui sont les plus répandus à travers le monde :

- Les Réacteurs à Eau pressurisée
- Les Réacteurs à Eau Bouillante
- Les Réacteurs à Neutrons Rapides.



3.1 Les Réacteurs à Eau pressurisée (REP)

Dans ces centrales, un premier circuit produit de la chaleur, la transporte via de l'eau sous pression puis l'échange avec l'eau d'un deuxième circuit dans lequel est produite l'électricité. L'eau du second circuit est ensuite refroidie grâce à un troisième circuit.

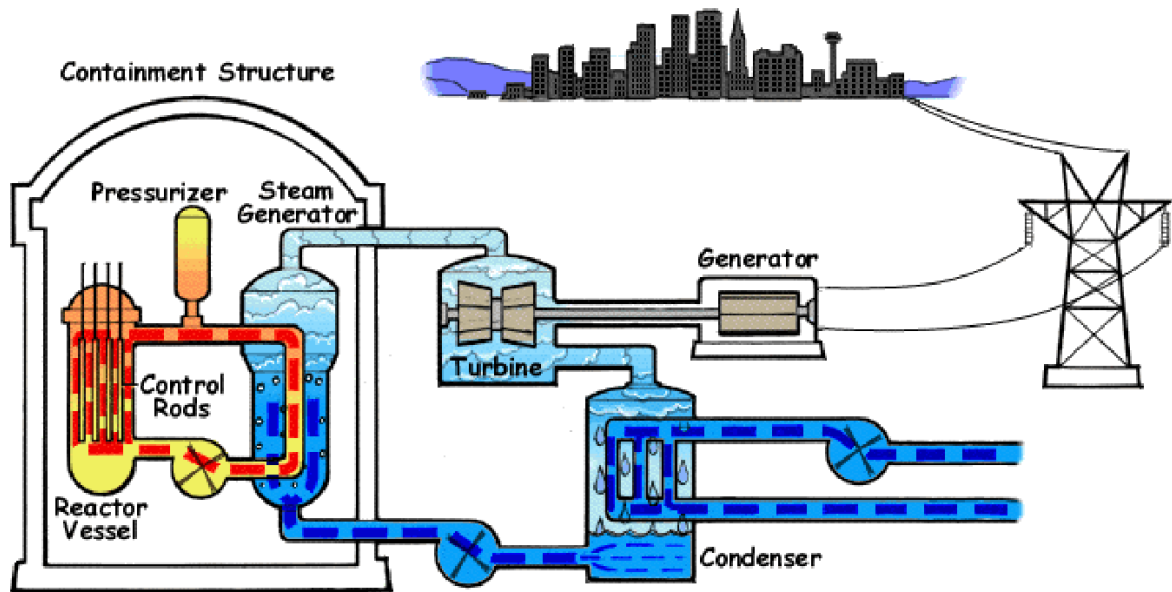


Fig 8: Schéma d'un réacteur à eau pressurisée

3.1.1 Le Cœur

Le cœur du réacteur est constitué de crayons contenant des pastilles d'oxydes d'uranium ou d'un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium (combustible dit MOX) répartis en assemblages combustibles, contenus dans une cuve en acier.[2]

3.1.2 Le circuit primaire

Le circuit primaire extrait la chaleur dégagée dans le cœur du réacteur par circulation d'eau sous pression dans les boucles de refroidissement. Chaque boucle, raccordée à la cuve du réacteur, comprend un générateur de vapeur et une pompe de circulation dite pompe primaire. Sur l'une des boucles, un pressuriseur contrôle les variations de pression et de volume du liquide primaire. L'eau sous pression, ou eau primaire, véhicule la chaleur prélevée dans le cœur du réacteur et la transfère à l'eau du circuit secondaire dans les générateurs de vapeur ; l'eau primaire est reprise par les pompes primaires qui la refoulent vers le cœur du réacteur. Le pressuriseur permet de maintenir la pression de l'eau primaire à 155 Bar, pour éviter l'ébullition de l'eau, qui est chauffée à plus de 300°C.[4]

3.1.3Le circuit secondaire

Le circuit secondaire est constitué principalement d'une boucle fermée parcourue successivement par l'eau sous forme de liquide dans une partie, sous forme de vapeur dans l'autre partie. La vapeur produite dans les générateurs de vapeur subit une détente partielle dans une turbine haute pression, puis traverse les séparateurs surchauffeurs avant d'être admise pour une détente finale dans les turbines basse pression, d'où elle s'échappe vers le condenseur. L'eau condensée est renvoyée vers les générateurs de vapeur par des pompes d'extraction relayées par des pompes alimentaires à travers des réchauffeurs basse et haute pression.[4]

3.1.4Les principaux circuits auxiliaires

Le circuit de refroidissement du réacteur à l'arrêt (RRA) a pour fonction lors de la mise à l'arrêt normale de réacteur, d'évacuer la chaleur du circuit primaire et la puissance résiduelle du combustible, puis de maintenir l'eau primaire à basse température tant qu'il y a du combustible dans le cœur. En effet, après l'arrêt de la réaction en chaîne, le cœur du réacteur continue à produire de la chaleur, appelée puissance résiduelle. Il est nécessaire d'évacuer cette puissance, qui autrement pourrait suffire à endommager, voire à faire fondre, le combustible, dégageant une grande quantité de produits radioactifs. LE circuit RRA sert également à vidanger la piscine du réacteur après rechargement du combustible.[4]

3.1.5Les circuits de sauvegarde

Le rôle des circuits de sauvegarde est de maîtriser et de limiter les conséquences des incidents et des accidents.[4]

3.1.6L'enceinte de confinement

L'enceinte de confinement des réacteurs à eau sous pression assure deux fonctions :

- le confinement a pour but la protection du public et de l'environnement contre les produits radioactifs susceptibles d'être dispersés à l'intérieur de l'enceinte en situation accidentelle ; à cette fin, les enceintes ont été dimensionnées pour résister à des valeurs de pression qui pourraient être atteintes en situation accidentelle et pour présenter des fuites minimales dans ces conditions ;
- La protection du réacteur contre les agressions externes.

Schéma de principe du confinement d'une enceinte d'un réacteur de 1300 MWe

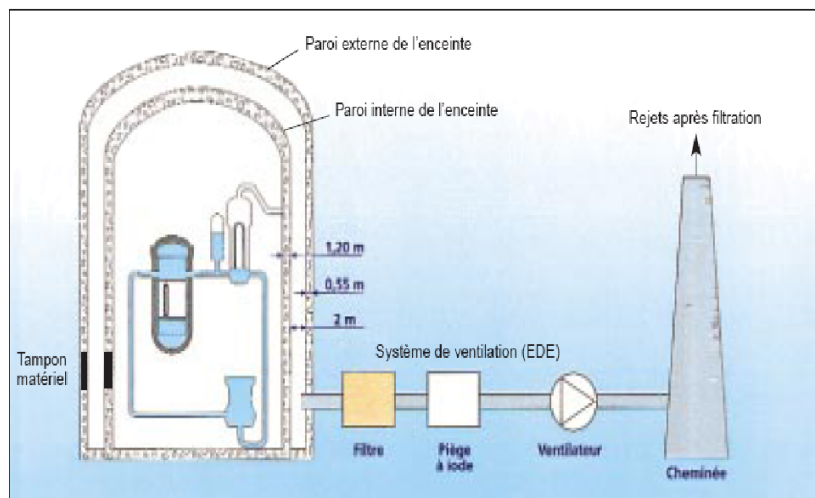


figure 9

Les enceintes de confinement des réacteurs à eau sous pression sont de deux types :

- Les enceintes de type 900 *MWe* , qui sont constituées d'une simple paroi en béton précontraint de 90 *cm* d'épaisseur. Cette paroi assure la résistance mécanique vis-à-vis de la pression de l'accident de référence et l'intégrité de la structure vis-à-vis d'une agression externe. L'étanchéité est quant à elle, assurée par une peau métallique de faible épaisseur située sur la face interne de la paroi en béton ;

- Les enceintes de type 1300 *MWe* et 1450 *MWe* , qui sont constituées de deux parois, la paroi interne en béton précontraint, la paroi externe en béton armé. L'étanchéité est assurée par la paroi interne et le système de ventilation qui collecte, dans l'espace entre les parois, les fuites provenant de l'intérieur comme de l'extérieur ; la résistance aux agressions externes est en partie assurée par la paroi externe.[12]

3.1.7 Les systèmes supports

Le fonctionnement de la centrale repose sur un certain nombre de fonctions dites supports, parmi lesquelles :

- L'alimentation en air comprimé des vannes pneumatiques.
- L'alimentation électrique des moteurs de vannes ou de pompes, et de tous les équipements électriques de surveillance et de contrôle-commande. Cette alimentation a plusieurs sources : la production de la central, une ligne électrique externe, des générateurs diesel de secours, des batteries...

-le circuit d'eau brute secourus (SEC), qui assure le refroidissement di circuit RRI au moyen de la source froide (mer ou rivière). [4]

3.2LE REACTEUR A EAU BOUILLANTE(REB)

Le réacteur à eau bouillante (**REB**) est un réacteur à neutrons thermiques dans lequel le modérateur est l'eau ordinaire, il constitue avec le réacteur à eau sous pression l'une des principales catégories de réacteurs en exploitation dans le monde.

A la différence d'un réacteur à eau sous pression , le(**REB**) n'a qu'un seul circuit d'eau alimentaire et de vapeur produite après évaporation dans la cuve ou l'eau et la vapeur en circulation peuvent être appelées primaires en ce sens que le fluide en question a traversé le cœur pour en extraire la chaleur produite.[2]

Les réacteurs à eau bouillante sont en service dans neuf pays, principalement au Japon et aux Etats-Unis.

Le schéma suivant illustre parfaitement le principe de fonctionnement du BWR sans circuit secondaire :

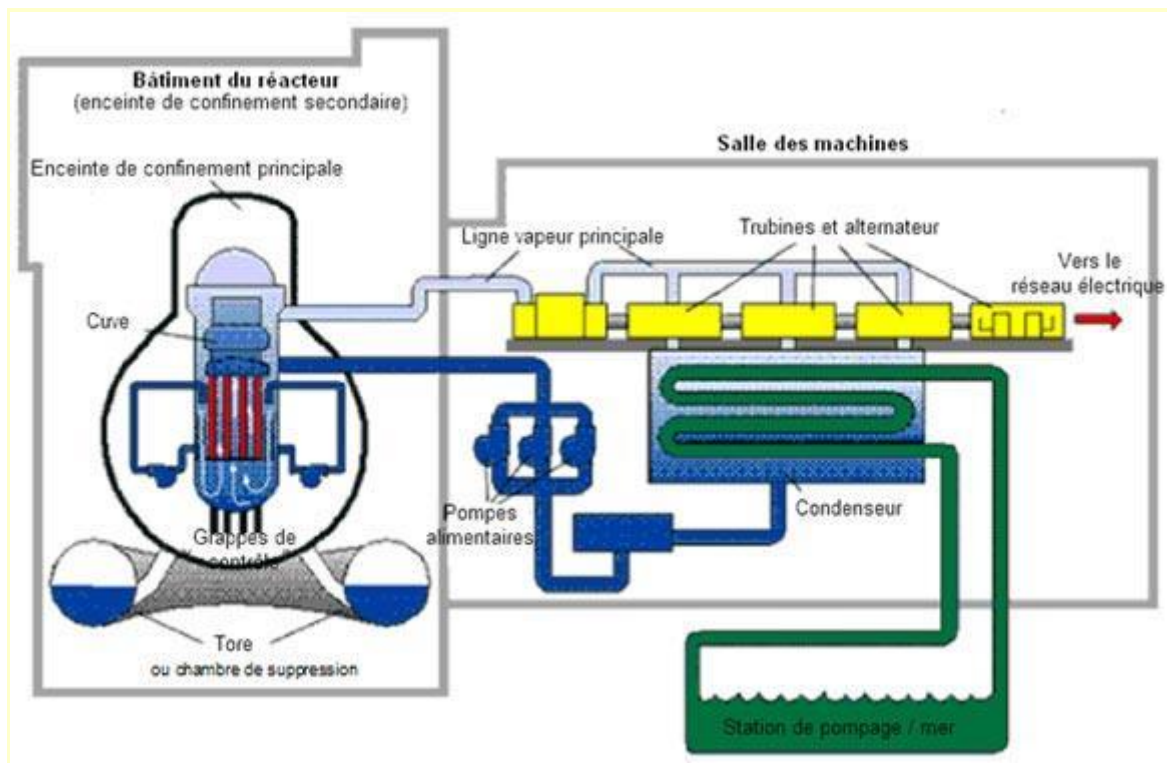


Fig 10: Réacteur à eau bouillante

Dans un réacteur à eau bouillante, l'eau ordinaire sert à la fois de caloporteur et de modérateur. Sa pression est beaucoup plus basse que dans un réacteur à eau sous pression (environ 7Mpa), si bien qu'elle se vaporise dès qu'elle absorbe la chaleur du réacteur. La

vapeur alimente directement le groupe turboalternateur qui produit de l'électricité. En raison de l'absence de générateur de vapeur, les réacteurs de ce type sont d'une conception plus simple que les REB, mais la radioactivité s'étend au groupe turboalternateur. [2]

Les différences notables entre le REB et le REP sont les suivantes :

- la pression primaire de fonctionnement d'un REB est sensiblement moitié moindre que celle d'un REP.
- la température de fonctionnement d'un REB est inférieure 25 à 30°C par rapport à celle d'un REP au niveau du circuit primaire dans son ensemble.
- les réacteurs à eau bouillante ne sont pas contrôlés à l'acide borique.
- dans les REB les mécanismes de manœuvre sont au-dessous du cœur alors que pour le REP.

3.3 Le réacteur à neutrons rapides

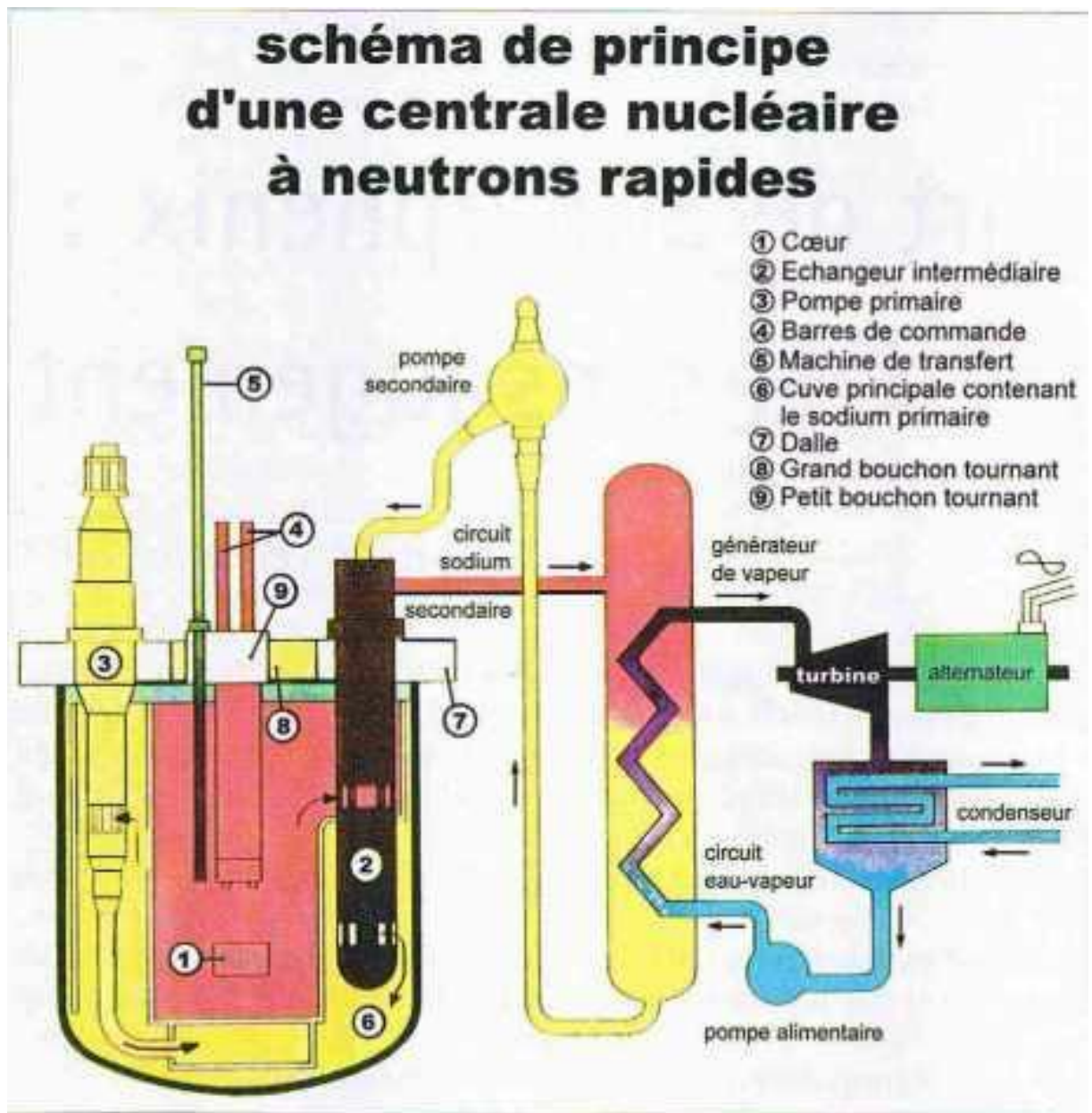


Fig 11: schéma d'un RNR

Un réacteur à neutrons rapides RNR est un réacteur nucléaire qui utilise des neutrons rapides par opposition aux neutrons thermiques utilisés dans les réacteurs déjà étudiés. Contrairement aux réacteurs nucléaires classiques, leur cœur n'est donc pas modéré. Les Neutrons émis lors de la fission d'un actinide ont initialement une vitesse élevée qui limite la probabilité qu'ils interagissent avec la matière fissile et conduisent à une réaction en chaîne. La non utilisation d'un modérateur permet alors d'avoir des neutrons rapides dont l'énergie cinétique est élevée, ces neutrons ont l'avantage de faire fissionner tous les noyaux lourds et non les seuls matériaux fissiles. [1]

Par le passé, les réacteurs rapides ont été démantelés, mais les réacteurs à neutrons rapides sont à nouveau à l'étude on en a retenue trois Concepts de réacteurs à neutrons Rapides :

a. Le réacteur à haute température refroidi au gaz (Hélium)

Le RRG permet le recyclage homogène (ou hétérogène) des actinides tout en conservant un gain de régénération supérieur à 1. Le concept de référence est un réacteur refroidi à l'hélium en cycle direct (ou indirect) avec un rendement élevé (48 %). La puissance volumique dans le cœur est déterminée de façon à limiter la température du combustible à 1600 °C. Le combustible, innovant, est conçu pour retenir les produits de fission. Le RRG est un concept très performant en termes d'utilisation des ressources naturelles et de minimisation des déchets à vie longue.[1]

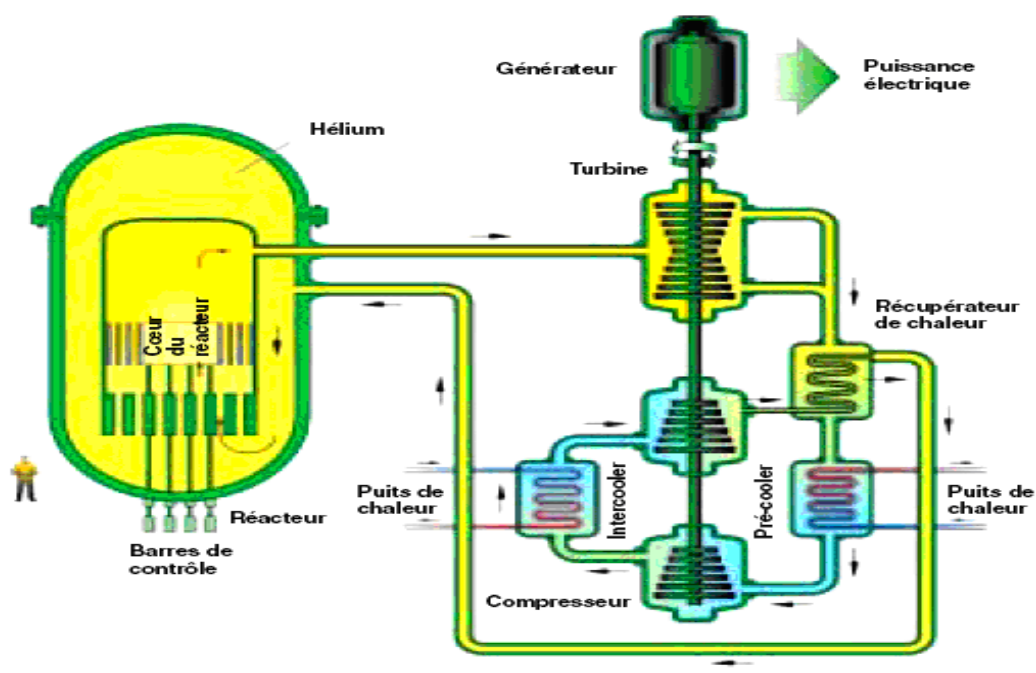


Fig 12: Schéma Réacteur à HT refroidi au gaz

b. Les réacteurs rapides refroidis au Sodium

Le SFR est un réacteur refroidi au sodium liquide à neutrons associé à un cycle fermé permettant le recyclage de l'ensemble des actinides et la régénération du plutonium. Du fait de la régénération de la matière fissile, ce type de réacteur peut fonctionner très longtemps sans intervention sur le cœur. Ce réacteur présente de très bonnes propriétés d'utilisation de ressources naturelles et de gestion des actinides, il a été évalué comme ayant de bonnes caractéristiques de sûreté.[1]

Réacteur rapide à caloporteur sodium

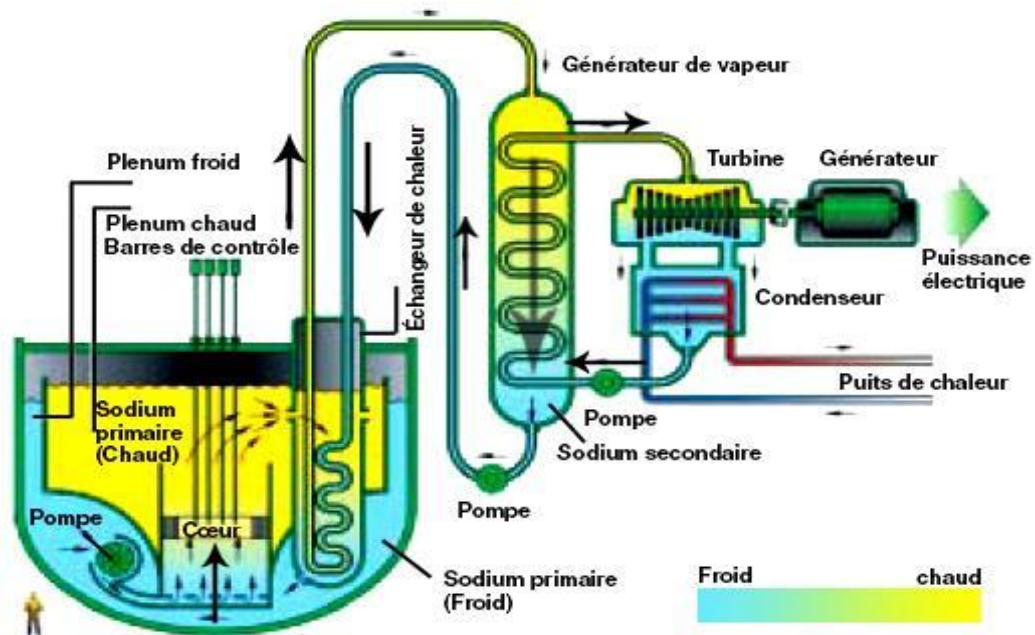


Fig 13: Schéma de Réacteur rapides refroidis au Sodium

c. Les réacteurs rapides refroidis au Plomb

Réacteur rapide à caloporteur plomb

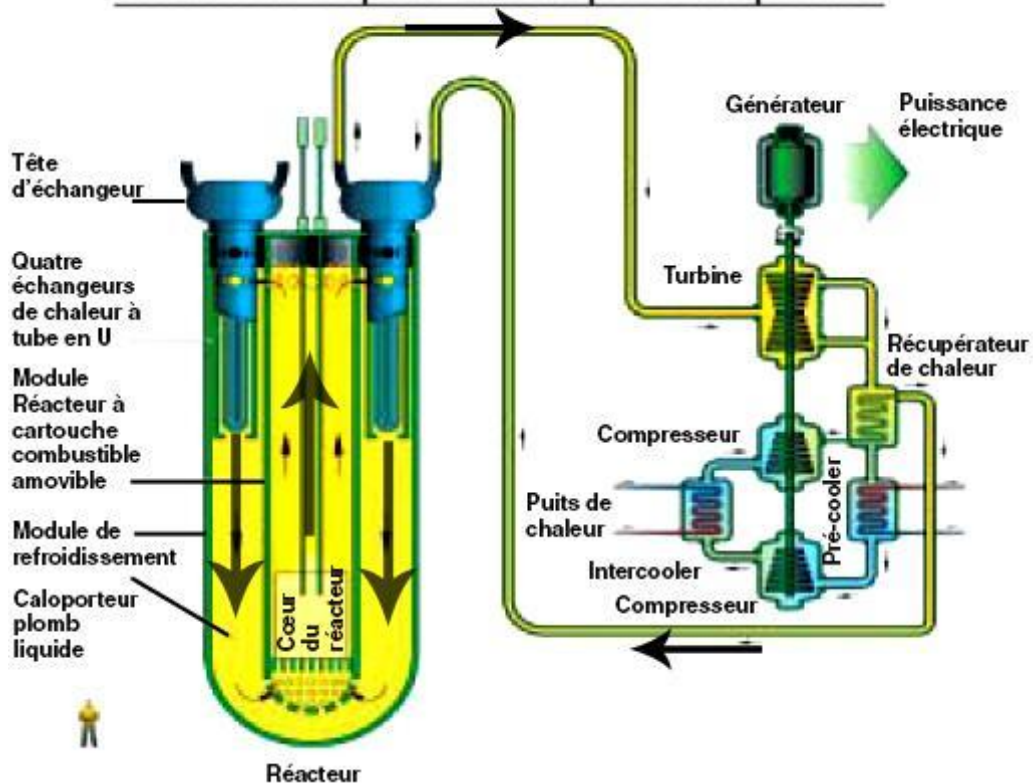


Fig 14 : schéma de réacteurs rapides refroidis au Plomb

Le RRP est un réacteur refroidi au plomb à neutrons rapides associé à un cycle fermé du combustible permettant une utilisation optimale de l'uranium. Ses concepts ont une gestion du combustible à longue durée. Les combustibles peuvent être soit métalliques, soit de type nitrure et permettent le recyclage de l'ensemble des actinides.[1]

4-Les générations de réacteurs nucléaires

Dans l'industrie nucléaire, la notion de génération est distincte de celle des filières technologiques. En effet, une génération peut inclure différentes technologies de réacteurs. Les différences entre les générations correspondent à des critères d'exigences spécifiques à chaque période.

On distingue quatre générations de réacteurs à fission nucléaire. Chaque génération répondait à des objectifs liés aux enjeux majeurs de l'époque de leur conception. Compte tenu de la durée de vie de ces équipements, on trouve encore en activité ou en cours de construction, des réacteurs de différentes générations. [3]

a .La 1ère génération de réacteurs nucléaires comprend les prototypes et les premiers réacteurs de taille industrielle à usage commercial mis au point dans les années 1950 et 1960 et entrés en service avant les années 1970. Conçu dans l'immédiat après-guerre 1939-1945, ces réacteurs devaient faire la démonstration du potentiel de la puissance atomique mise au service de l'énergie civile. [3]

b. La 2ème génération des réacteurs nucléaires sont entrés en service à partir des années 1970. Ils correspondaient à la nécessité d'une meilleure compétitivité de l'énergie nucléaire et d'une amélioration de l'indépendance énergétique, dans un contexte de fortes tensions sur le cours des énergies fossiles (choc pétrolier). La majorité des réacteurs actuellement en exploitation dans le monde sont des réacteurs de deuxième génération en France. [3]

c.La 3ème génération de réacteurs nucléaires, qui s'apprête aujourd'hui à prendre progressivement le relais, met l'accent sur les impératifs liés à la sûreté et à la sécurité (résistance renforcée aux agressions externes, type chute d'avion). Ces réacteurs tirent les enseignements du retour d'expérience de l'exploitation des réacteurs de génération 2, des accidents de Three Miles Island et de Tchernobyl ainsi que des attentats du 11 septembre 2001. [3]

d.La 4ème génération correspond aux réacteurs, actuellement en conception, qui pourraient voir un déploiement industriel à l'horizon 2040-2050, et probablement plus tôt en Inde ou en Chine. Ils sont en rupture technologique totale avec tout ce qui a été réalisé jusqu'à présent. [3]

Chapitre III

3.1 Description de la technique de production de l'énergie nucléaire

L'extraction de la chaleur se produit dans le circuit primaire du réacteur. Placés dans une cuve en acier remplie d'eau, qui les porte à haute température. L'eau de la cuve s'échauffe à leur contact (plus de 300°C). Elle est maintenue sous pression, ce qui l'empêche de bouillir, et circule dans un circuit fermé appelé circuit primaire. [4]

Figure 15 schéma d'un réglage de pression



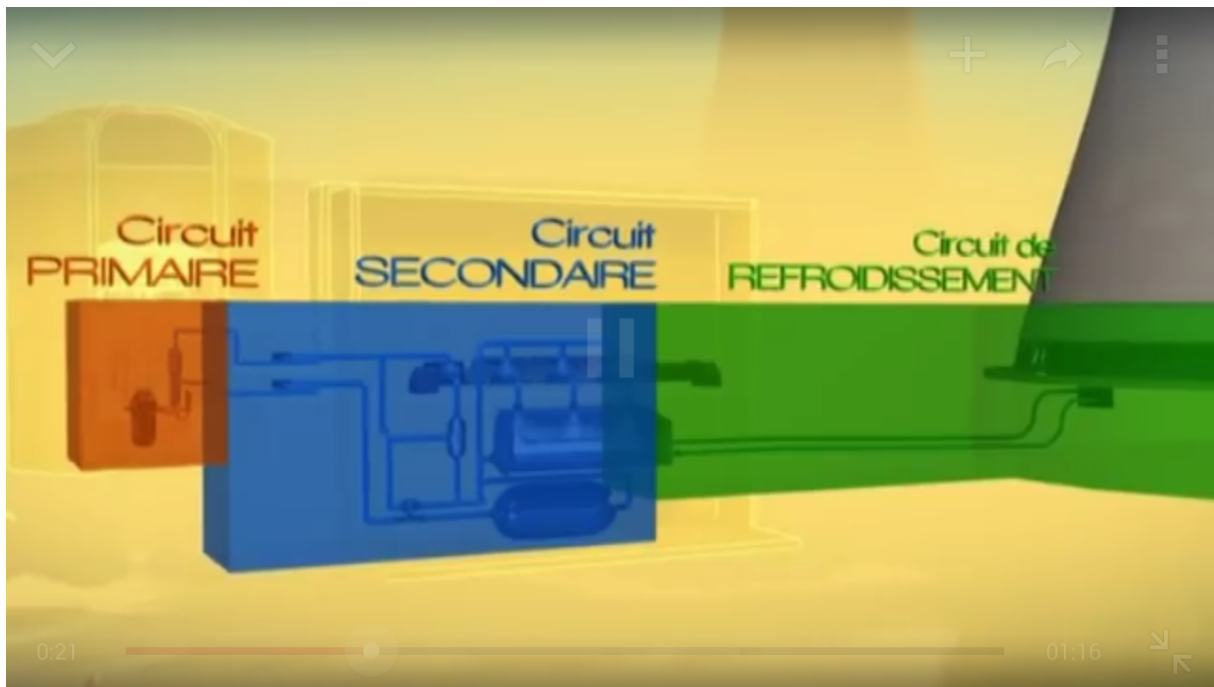


figure 16 schéma des trois circuits

L'eau du circuit primaire transmet sa chaleur à l'eau circulant dans un autre circuit fermé : le circuit secondaire.

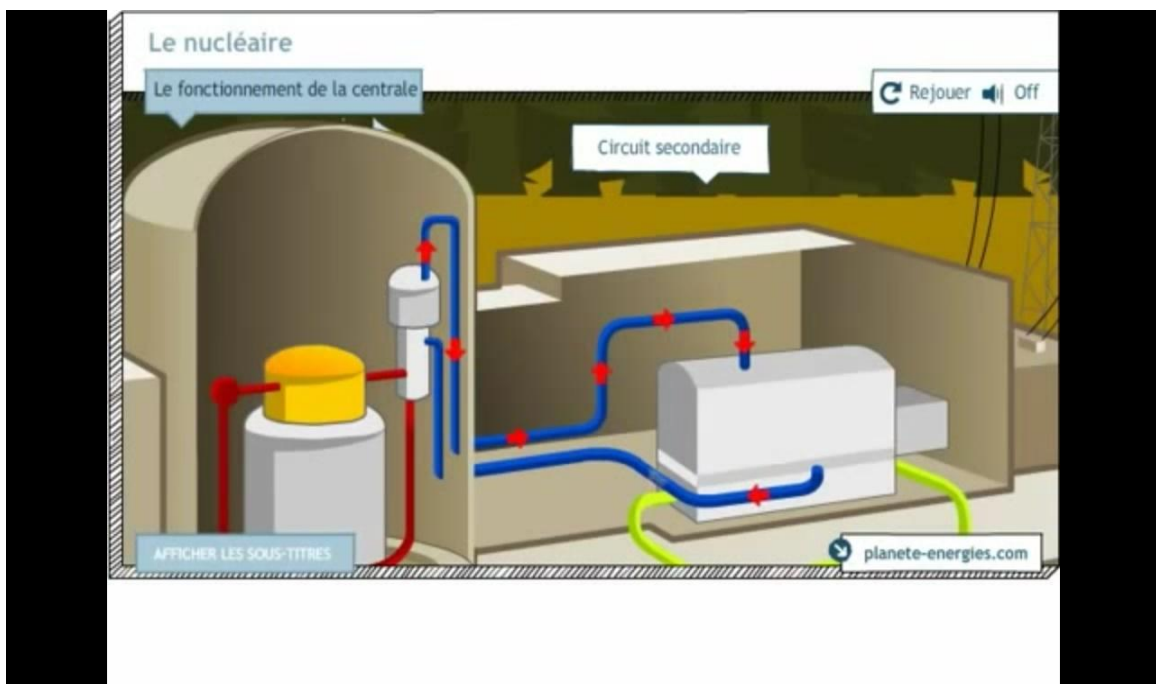


figure 17

Cet échange de chaleur s'effectue par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur.

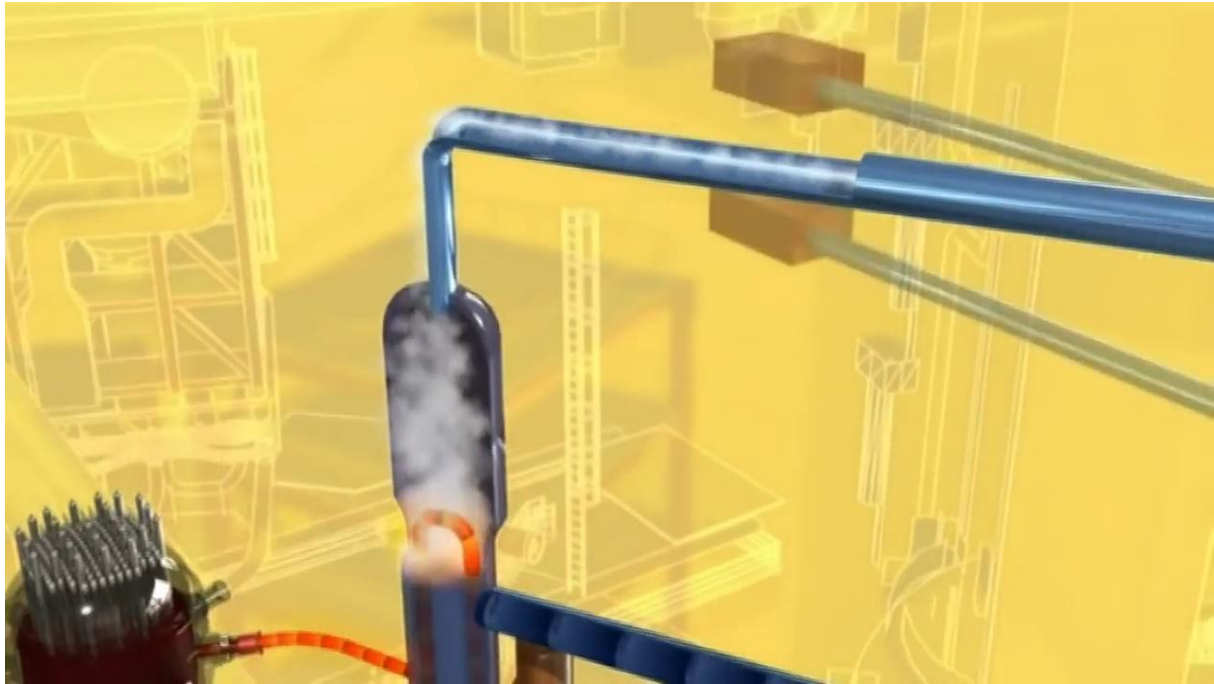


figure 18 schéma d'un vaporiseur

Au contact des tubes parcourus par l'eau du circuit primaire, l'eau du circuit secondaire s'échauffe à son tour et se transforme en vapeur. Cette vapeur fait tourner la turbine entraînant l'alternateur qui produit l'électricité.

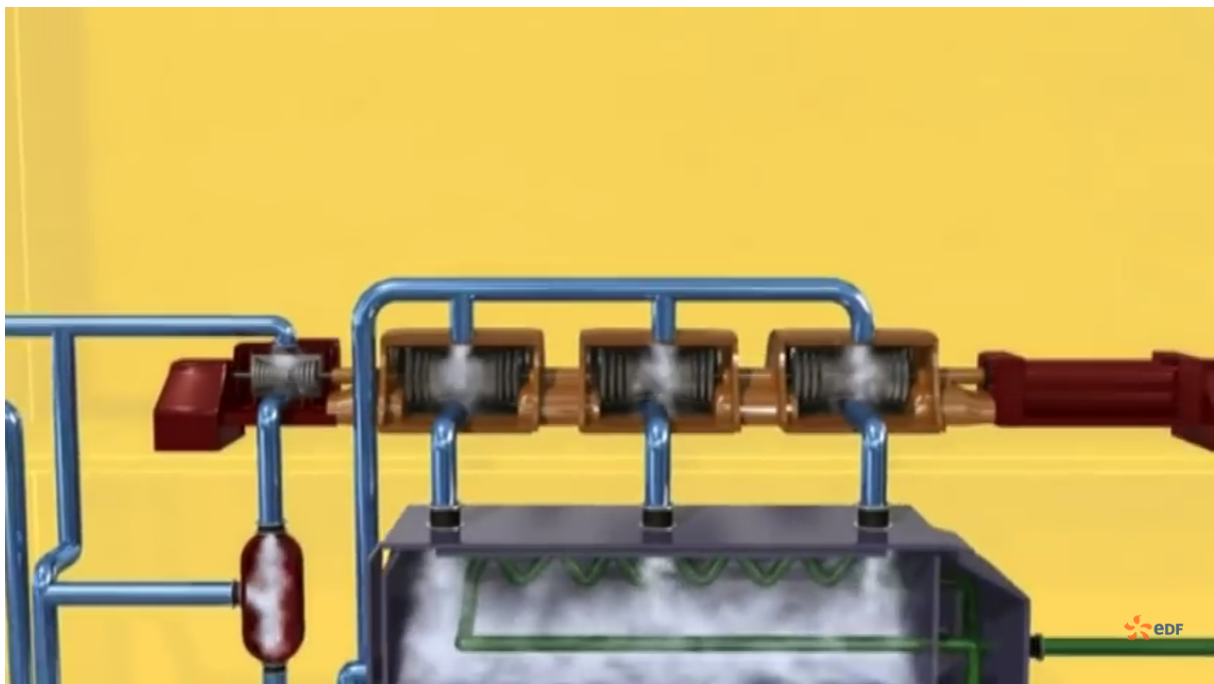


figure 19 schéma d'une turbine

Après son passage dans la turbine, la vapeur est refroidie, retransformée en eau et renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle. Pour que le système fonctionne en continu, il faut assurer son refroidissement. C'est le but d'un troisième circuit indépendant des deux autres, le circuit de refroidissement. Sa fonction est de condenser la vapeur sortant de la turbine. Pour cela est aménagé un condenseur, appareil formé de milliers de tubes dans lesquels circule de l'eau froide prélevée à une source extérieure : rivière (ou mer). Au contact de ces tubes, la vapeur se condense pour se transformer en eau. Quant à l'eau du condenseur, elle est rejetée, légèrement échauffée, à la source d'où elle provient. Si le débit de la rivière est trop faible, ou si l'on veut limiter son échauffement, on utilise des tours de refroidissement. [4]

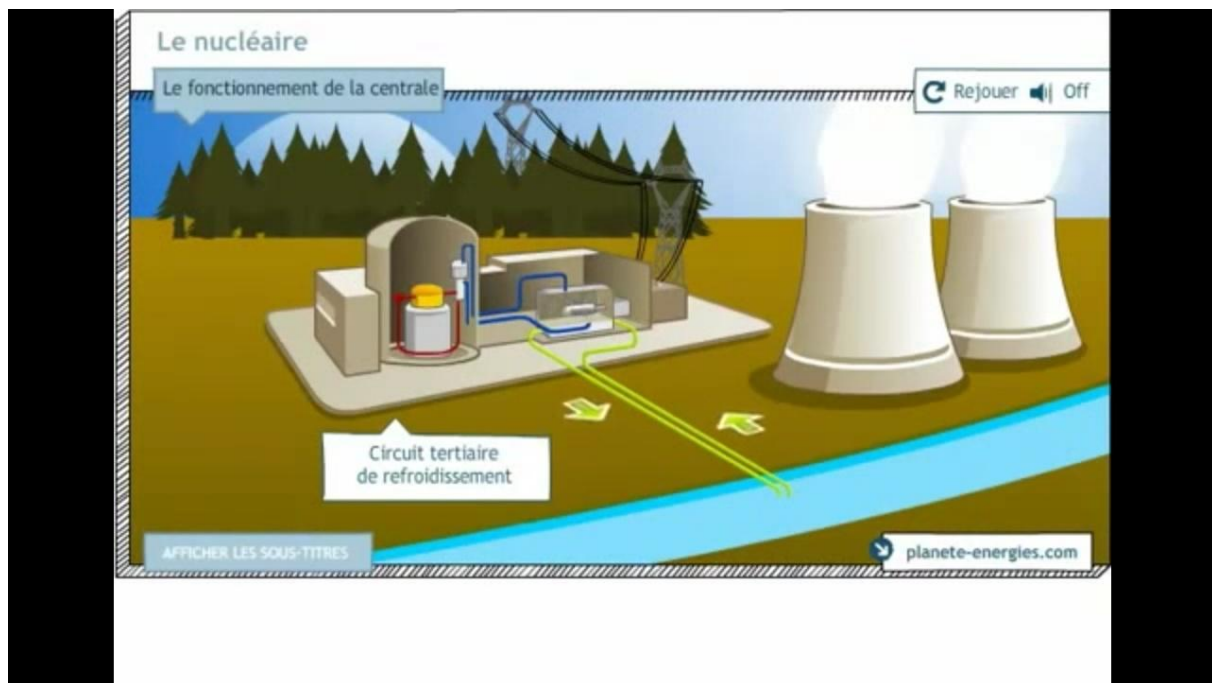


figure 20 schéma d'un centrale nucléaire

L'eau échauffée provenant du condenseur, répartie à la base de la tour, est refroidie par le courant d'air qui monte dans la tour. L'essentiel de cette eau retourne vers le condenseur, une petite partie s'évapore dans l'atmosphère, ce qui provoque ces panaches blancs caractéristiques des centrales nucléaires. [4]

3.2 Les avantages et caractéristique de l'énergie nucléaire

-Les combustibles fossiles (le charbon, pétrole...) produit plus de dioxyde de carbone ; responsable de 40% des émissions totales de CO₂ ; par contre la nucléaire comme l'autre énergie renouvelables, n'émet quasiment pas de CO₂ directement. [14]

-un kg d'uranium naturel produit 50 000 kWh dans le réacteur nucléaire par contre un kg de bois produire 2 kWh et un litre de pétrole produire 6 kWh, et le combustible nucléaire restera plusieurs années dans le réacteur, contrairement aux combustibles classiques qui sont brûlés rapidement. [14]

-L'énergie nucléaire participe au développement durable et permet d'économiser les ressources traditionnelles fossiles pour les réserver à des utilisations plus nobles (chimie, plastique...).

-Les 440 réacteurs nucléaires installés dans le monde économisent près de 3 milliards de tonnes de CO₂ par an, en fournissant 16-17 % de l'énergie électrique disponible. [14]

3.3 Les inconvénients et les dangers de l'énergie nucléaire

-Les déchets nucléaires ils présentent des dangers liés à la nocivité des rayonnements émis par les éléments radioactifs qu'ils renferment. L'une des particularités des déchets radioactifs réside dans l'épuisement progressif de leur dangerosité, à mesure que les sources de leur rayonnement s'éteignent. Mais cet épuisement, en relation avec la période radioactive des éléments contenus, peut être très lent pour les déchets dits à vie longue.

Mais ils sont en faible quantité, bien conditionnés et protégés dans des sites peu nombreux, bien répertoriés et surveillés, et leur radioactivité décroît avec le temps, même si c'est parfois long, alors que bien des déchets chimiques au moins aussi toxiques restent éternellement dangereux.

Exemples des déchets nucléaires :

*Déchets chimiques très toxiques ~ 2 000 000 t/an.

*Déchets nucléaires à vie courte ~ 50 000 t/an.

*Déchets nucléaires à vie longue ~ 6 000 t/an.

-Les dangers relatifs aux accidents du type Tchernobyl sont excessivement réduits après la leçon tirée de cette catastrophe. Il s'agit plus d'un accident "soviétique" que d'un accident nucléaire. Il suffit de comparer l'accident similaire de Three Mile Island en 1979 aux USA qui n'a pas fait de mort, alors que dans un contexte "Tchernobylien" il aurait eu les conséquences de Tchernobyl. [14]

-Les dangers de proliférations de l'uranium très enrichi et du plutonium pour les transformer en explosifs nucléaires sont le fait d'actions volontaristes et d'officines militaires, et non de l'industrie civile. L'uranium peu enrichi est incapable de produire des explosifs sans un

enrichissement très difficile à mettre en œuvre, et le plutonium civil généré dans les réacteurs les plus courants (réacteurs à eau sous pression ou à eau bouillante) est inadapté à la fabrication d'armes de destruction massives. Par ailleurs, le saupoudrage de populations par des déchets radioactifs est une entreprise hasardeuse pour qui l'entreprend. [14]

- Les dangers de la radioactivité: Ejectés du noyau qui se désintègre, les particules et les photons peuvent traverser la matière inerte ou vivante.

En la traversant, les particules alpha, beta et les rayonnements gamma provoquent des ionisations, ou des excitations d'atomes susceptibles d'entraîner des réactions chimiques anormales.

Quelques heures ou même quelques années après une exposition au rayonnement, des réactions secondaires peuvent apparaître; des macromolécules fondamentales au niveau cellulaire (ARN, ADN) sont touchées. Des altérations morphologiques sont observées, notamment des effets génétiques; des cellules sont détruites ou leur processus de division altéré.

Lors de retombées radioactives, les nucléides sont absorbés par les plantes et se retrouvent ainsi dans la chaîne alimentaire. C'est la raison du grand émoi suscité par la catastrophe de Tchernobyl du 25 avril 1986, où des quantités importantes d'isotopes radioactifs (iode, cobalt, césium,...) furent émises puis véhiculées par les vents sur une grande partie de l'Europe occidentale. [14]

Conclusion

L'énergie nucléaire est une technologie jeune, car le premier réacteur industriel fut mis en service en 1956, moins de 20 ans après la découverte de la fission. Il faut donc s'attendre à de grands développements comme ce fut le cas pour le charbon, la vapeur, l'automobile, les avions...

Avec l'énergie nucléaire on change de dimension en matière de puissance potentielle : un kilogramme de bois est capable de produire 2 kilowattheure, 1 litre de pétrole 6 kWh, mais un kg d'uranium naturel 50 000 kWh dans les réacteurs actuels, et 50 fois plus dans les réacteurs de l'avenir.

En conséquence, il est possible de produire de grandes quantités d'énergie d'une manière très compacte : une centrale de 1 million de KW (1 000 mégawatts MW) n'occupe que quelques hectares.

Le corollaire, c'est que le kWh fourni dépend très peu du coût du combustible. La croûte terrestre renferme de grandes quantités d'uranium naturel. L'énergie nucléaire participe donc du développement durable et permet d'économiser les ressources traditionnelles fossiles pour les réserver à des utilisations plus nobles (chimie, plastiques... en les recyclant autant que possible). [14]

- Il est connu que l'énergie nucléaire "brûle" l'uranium en ne générant quasiment pas de CO₂ ou autre gaz à effet de serre. Les 440 réacteurs nucléaires installés dans le monde économisent près de 3 milliards de tonnes de CO₂ par an tout en fournissant 16-17 % de l'énergie électrique disponible. Chaque Allemand ou Danois génère par an environ 10 tonnes de CO₂, un Français, 6,5 tonnes seulement, grâce à l'équipement nucléaire et hydraulique du pays. [14]

Puissance, compacité, indépendance énergétique à long terme, faible influence des variations de prix du combustible sur le prix du kilowattheure, pas d'effet de serre, bonne compétitivité et, nous allons le voir, grand propreté et grande sécurité. L'énergie nucléaire donc joue un grand rôle, car la population mondiale est amenée à croître de 6 milliards d'habitants en 2000 à environ 8 milliards en 2050, mais 25 % seulement aujourd'hui de gens riches consomment 75 % de toute l'énergie produite, et plus de 2 milliards d'habitants de la planète n'ont pas accès à l'énergie commerciale. [14]

On estime que l'énergie totale dont le monde aura besoin en 2050 sera le double d'aujourd'hui mais que les besoins en électricité vont tripler du fait de la souplesse d'utilisation de ce type d'énergie. Ceci principalement du fait des pays en développement ou émergents.

Malgré le développement utile et nécessaire des énergies renouvelables, souvent amenées à jouer un rôle primordial dans les pays émergents, ces dernières ne pourront pas - et de loin - suffire au développement et besoins massifs requis. Le pétrole et le gaz verront leurs réserves plafonner d'ici peu d'années et l'effet de serre limitera le recours au charbon. On entrera peut-être dans une "civilisation de l'hydrogène" pour les transports terrestres (piles à combustible) et le nucléaire sera appelé là aussi à fournir l'énergie nécessaire, ainsi que pour produire de l'eau douce, d'irrigation, contribuer à des synthèses chimiques...

C'est ainsi que les experts estiment que l'énergie nucléaire pourra couvrir en 2050 environ 20% des besoins en énergie totale (6,5 % aujourd'hui). [14]

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : J.R. Lamarsh, *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, Addison- Wesley (1976)
- [2] : G.I. Bell and S. Glasstone, *Nuclear Reactor Theory*, Van Nostrand (1970)
- [3] : fr.wikipedia.org/wiki/
- [4] : www.cea.fr/technologies
- [5] : A.F. Henry, *Nuclear Reactor Analysis*, MIT Press (1975)
- [6] : [http://www.Connaissance des Énergies.com](http://www.Connaissance_des_Energies.com)/Principes de fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- [7] : Badkiller.alex.pagesperso-orange.fr
- [8] : tpe-de-eolienne.e-monsite.com
- [9] : www.iscience.ca
- [10] : www.energieplus-lesite.be
- [11] : <http://www.aixiafrance.com/votre-centrale-solaire-photovoltaïque.html>
- [12] : R. Barjon, *Physique des Réacteurs Nucléaires*, (1993)
- [13] : www.ecosources.info/energies_renouvelables/Energie_eau_mer_ocean
- [14] : http://www.ecolo.org/documents_in_french/caracteristiquesNuc.htm
- [15] : J.J. Duderstadt and L.J. Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis*, J.Wiley (1976)
- [16] : <http://www.futura-sciences.com>
- [17] : Cour du physique nucléaire SMP 6 (Mr A .sabir-2014/2015)
- [18] : projet de fin d'études « les sources d'énergie »/faculté des sciences Rabat-année universitaire : 2009-2010