



Faculté des Sciences Exactes  
Département de PHYSIQUE

## Mémoire de Master

Spécialité: Physique Théorique

Thème

Etude descriptive d'un réacteur nucléaire

Présenté par

Melle Boudraa Aicha

Soutenu le: 21/10/2021

Devant le Jury composé de:

<b>GHARBI</b>	<b>Abdelhakim</b>	<b>Professeur</b>	<b>Président</b>
<b>BELABBAS</b>	<b>Abdelmoumene</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>
<b>OULEBSIR</b>	<b>Nadia</b>	<b>MCA</b>	<b>Rapporteur</b>

Année universitaire 2020/2021

## **Dédicaces**

### **A ma mère**

*A qui je dois plus que je ne saurai exprimée.  
Mes pauvres mots ne peuvent jamais exprimer ma reconnaissance  
et ma profonde gratitude  
pour le sacrifice que tu as fait et que tu continues à faire pour  
mon bonheur et ma réussite.  
Puisse ce projet être le reflet quoique insuffisant de ma gratitude  
et mon amour.*

### **A mon père**

*Pour tout ce que je te dois tu as toujours été mon soutien et mon  
guide, que ce projet soit un  
témoignage de ma profonde reconnaissance et mon grand amour.  
Je prie Allah pour qu'il t'alloue bonne santé et longue vie.*

### **A mes frères**

*Tarek, Islam et Chihab Eddine  
Avec tout mon amour et ma tendresse. En témoignage de mon  
profond amour et attachement  
que Allah vous procure beaucoup de bonheur et de succès.*

### **A mes amies**

#### **Hanane et Zakia**

*Pour leur aide précieuse dans l'élaboration de ce travail qu'ils  
trouvent ici le témoignage de  
ma reconnaissance et mon affection.*

### **A tous ceux que j'aime**

*Ils sont nombreux qu'ils trouvent ici l'expression de mon respect  
et mon affection.*

## ***Remerciement***

*J'adresse mes remerciements à Mme Oulebsir Nadia,  
Mon encadrante  
pour ses conseils avisés, sa grande disponibilité et ses  
encouragements tout au long  
de mes travaux.*

*Je remercie également les membres du jury monsieur Gharbi  
Abdelhakim, et monsieur Belabbas Abdelmoumene  
Qui m'ont honoré de présider et d'examiner  
ce travail*

*Je remercie aussi mes enseignants du Master  
de physique théorique  
de l'université de Bejaia  
Sans oublier toute ma famille.*

***Merci...***



## *Sommaire*

*Remerciement*

*Dédicaces*

*Introduction générale..... 1*

### **CHAPITRE I : NOTIONS DE BASE**

*1/ Réactions de fissions ..... 03*

*2/ Réaction en chaîne ..... 04*

*3/ Bilan neutronique..... 05*

*4/ La section efficace ..... 05*

### **CHAPITRE II : DESCRIPTION D'UN REACTEUR NUCLEAIRE**

*1/ Histoire des réacteurs nucléaires..... 08*

*2/ Description d'un réacteur nucléaire..... 09*

*3/ Composants d'un réacteur ..... 10*

*3.1 Le combustible ..... 11*

*3.2 Les barres de commandes..... 12*

*3.3 Le modérateur..... 13*

*3.4 Le caloporteur (Transporteur de chaleur)..... 14*

*4/ Fonctionnement ..... 15*

*5/ Les applications ..... 19*

*5.1 Production de chaleur ..... 19*

*5.2 Production de plutonium..... 19*

<i>5.3 Production de neutrons libres ou d'isotopes radioactifs.....</i>	<i>20</i>
<i>5.4 Production d'électricité .....</i>	<i>20</i>

**CHAPITRE III : DIFFERENTS TYPES ET DIFFERENTES GENERATIONS DE  
REACTEURS NUCLEAIRES**

<i>1/ Les différents types de réacteur .....</i>	<i>22</i>
<i>1.1 Réacteur à eau légère .....</i>	<i>22</i>
<i>1.1.1 Réacteur à eau sous pression (PWR/EPR) .....</i>	<i>22</i>
<i>1.1.2 Les réacteurs à eau bouillante ou REB .....</i>	<i>23</i>
<i>1.2 Les réacteurs à eau lourde .....</i>	<i>24</i>
<i>1.3 Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) .....</i>	<i>25</i>
<i>1.4 Les réacteurs caloporteurs gaz (RCG).....</i>	<i>28</i>
<i>2/ Les générations de réacteurs nucléaires.....</i>	<i>30</i>
<i>2.1 La 1ère génération de réacteurs nucléaires.....</i>	<i>30</i>
<i>2.2 La 2ème génération de réacteurs nucléaires .....</i>	<i>31</i>
<i>2.3 La 3ème génération de réacteurs nucléaires .....</i>	<i>32</i>
<i>2.4 La 4ème génération de réacteurs nucléaires .....</i>	<i>33</i>

**CHAPITRE IV : GESTION DES DECHETS NUCLEAIRES**

<i>1/ Définition des déchets nucléaires... ..</i>	<i>36</i>
<i>2/ Classification des déchets radioactifs .....</i>	<i>36</i>
<i>3/ Gestion des déchets nucléaires.....</i>	<i>37</i>

<i>3.1 La santé humaine .....</i>	<i>37</i>
<i>3.2. Sécurité nucléaire .....</i>	<i>38</i>
<i>3.2.1 Sureté des réacteurs.....</i>	<i>39</i>
<i>3.3. Environnement .....</i>	<i>39</i>
<i>3.4 Energie .....</i>	<i>41</i>
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>44</i>
<i>Liste bibliographique</i>	
<i>Résumé</i>	

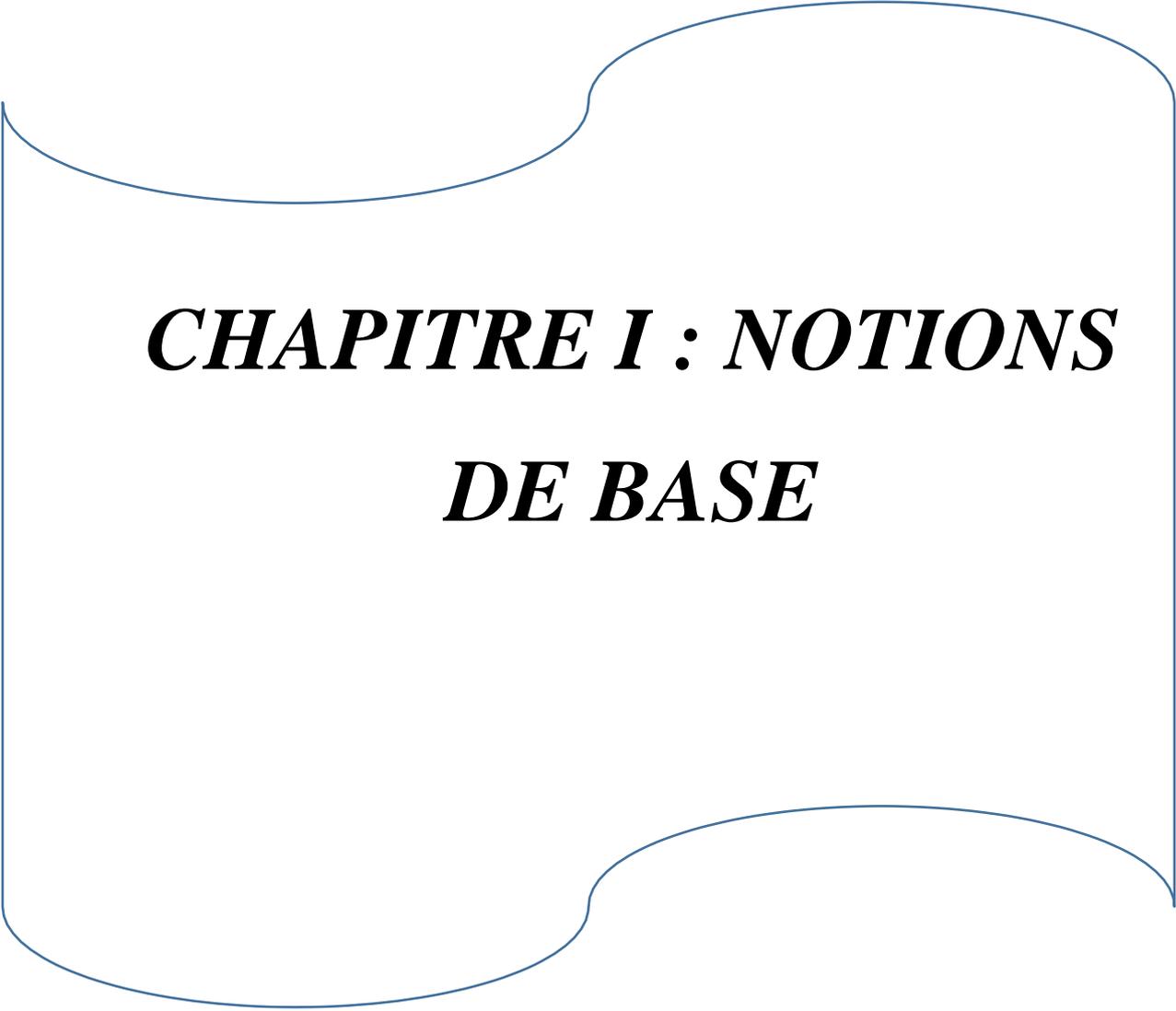


***Introduction  
générale***

## **Introduction générale**

L'énergie électrique joue un rôle essentiel dans notre vie quotidienne. Elle est l'un des éléments clé au développement durable de la société humaine. Plusieurs modes de production d'électricité, qui s'appuient sur différentes sources d'énergie, coexistent aujourd'hui : les énergies renouvelables (hydraulique, éolienne, solaire...), l'énergie thermique à combustion (charbon, gaz, pétrole) et nucléaire. Les modes de production de l'énergie électrique (hors photovoltaïque) qui s'appuient sur les centrales nucléaires sont basés sur le même principe : faire tourner une turbine couplée à un alternateur pour produire de l'électricité. La différence de fonctionnement se situe au niveau de l'entraînement de la turbine. Dans les centrales hydrauliques, c'est l'eau des barrages qui actionne la turbine. Dans les centrales thermiques classiques, elle est activée par la vapeur d'eau obtenue lorsque le combustible fossile (charbon, gaz naturel ou pétrole) est brûlé. Dans les centrales nucléaires, des atomes d'uranium, en se cassant, produisent de la chaleur qui transforme l'eau en vapeur, permettant ainsi la mise en mouvement de la turbine [1].

Ce mémoire est consacré à l'étude descriptive d'un réacteur nucléaire destiné à produire de l'énergie électrique d'origine nucléaire. Le Travail est développé en quatre chapitres. Le premier intitulé « Notions de base », dans lequel on a défini certaines notions physiques élémentaires, notamment la fission nucléaire, utiles pour cette étude. Dans le deuxième chapitre « Description d'un réacteur » on décrit le fonctionnement général et les différentes composantes d'une centrale nucléaire. Le troisième chapitre « Différents types et Différentes générations de réacteur nucléaire » résume chaque type et chaque génération de réacteur nucléaire à travers leur évolution dans le temps. Le quatrième chapitre « Gestion des déchets nucléaire » est consacré aux généralités sur les déchets nucléaires avec un éclairage particulier sur la sûreté nucléaire pour finir sur quelques concepts proposés par les chercheurs pour les réacteurs du futur. Finalement une conclusion générale vient résumer le travail effectué tout en présentant quelques perspectives.



***CHAPITRE I : NOTIONS  
DE BASE***

## 1/ Réactions de fissions

Ce sont les réactions qui se produisent dans les réacteurs de centrales nucléaires actuelles sous l'action d'un neutron, un noyau lourd devient instable et se divise pour donner naissance à deux nouveaux noyaux plus légers avec libération de plusieurs neutrons (voir figure 1), cette transformation est mise à profit dans certaines centrales nucléaires car elle libère énormément d'énergie (équation 1) cependant les deux nouveaux noyaux formés sont instables ils vont donc pouvoir se désintégrer.

Il existe deux types de fissions : la fission spontanée et la fission induite.

- **Fission spontanée** : La fission spontanée est un processus de décomposition, dans lequel un noyau instable se divise spontanément et aléatoirement en parties plus petites (noyaux plus légers). Les fissions spontanées libèrent des neutrons comme le font toutes les fissions
- **Fission induite** : la fission induite est une forme particulière de l'absorption neutronique. Après que le noyau ait absorbé le neutron l'atome va se décomposer en 2 noyaux plus légers et un certain nombre de neutrons.

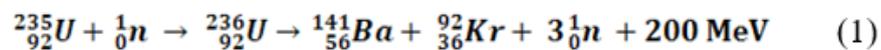


Figure 1: une réaction de fission d'uranium 235

## 2/ Réaction en chaîne

Une réaction en chaîne (voir figure 2) peut se produire si le nombre de neutrons libéré est supérieur ou égal à 1, et si ces neutrons ne sont pas trop rapides et ont le temps de fissionner d'autres noyaux fissiles existant dans le milieu de fission. Les énergies cinétiques des neutrons produits de la fission finiront par se transformer en énergies thermiques suite aux différentes collisions dans le milieu réactionnel.

Ces neutrons doivent surtout ne pas s'échapper du milieu dans un premier temps, sinon ils déclencheront d'autres réactions de fission (réaction en chaîne). Dans une centrale nucléaire, ces réactions sont contrôlées par des équipements appropriés, qui absorbent la plupart des neutrons émis, contrôlant ainsi l'énergie produite.

L'uranium naturel contient une grande quantité d'uranium 238 (99.3%) et de l'uranium 235 (0.7%). L' $U^{238}$  n'est pas utilisé directement dans le réacteur d'une centrale nucléaire car il consomme trop de neutrons et en général ne fissionne pas en présence de neutrons de basses énergies. L'uranium utilisé dans les réacteurs nucléaires est  $U^{235}$  (0.7%) qui est extrêmement fissile, il est d'abord enrichi à au moins 3-5 % avant de pouvoir être utilisé dans la production de l'énergie. Le processus d'enrichissement en  $U^{235}$  est trop compliqué et il n'est pas accessible à tout le monde, c'est l'étape la plus difficile dans le processus de fabrication de l'énergie ou dans l'armement [2].

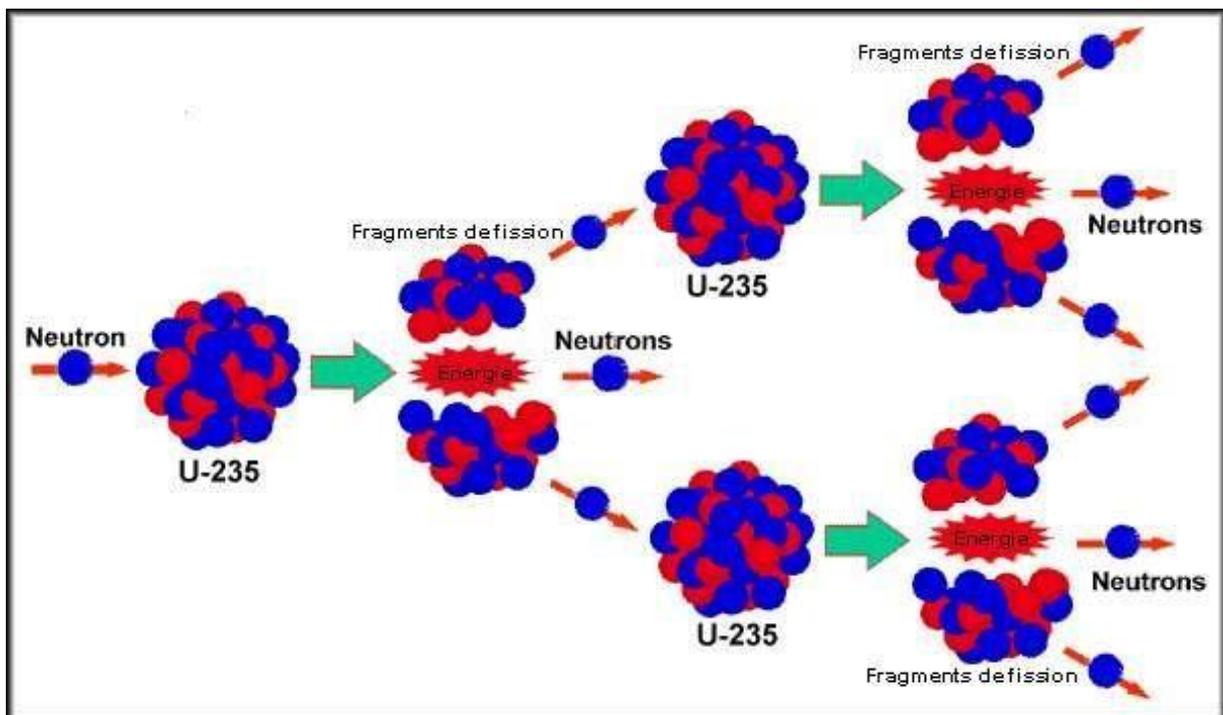


Figure 2: une réaction en chaîne schématisée de l'uranium 235

### **3/ Bilan neutronique**

Dans un milieu contenant des matières fissiles, le groupe de neutrons initial augmentera de façon exponentielle, la réaction en chaîne sera alors déclenchée. Afin de maîtriser cette réaction, le nombre de neutrons produit doit être contrôlé. L'évolution du groupe neutronique est paramétré par un facteur appelé facteur **de multiplication effectif**  $k_{eff}$ . Ce dernier dépendra du nombre de neutrons de la fission causée par une génération  $n_i$  et du nombre d'une génération suivante  $n_{i+1}$  sera donné par :

$$k_{eff} = \frac{n_{i+1}}{n_i}$$

Le facteur de multiplication effectif dépend des dimensions géométriques du réacteur, propriétés du modérateur et du combustible dont on parlera au chapitre II

Au fait, dans un réacteur on essaie de maintenir le  $k_{eff}$  égal à 1 pour ainsi créer un niveau de puissance stationnaire [3]. A la place du facteur de multiplication  $k_{eff}$  on utilise aussi souvent la réactivité  $\rho$  [4] qui est définie comme suit (voir le chapitre 2) :

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$$

### **4/ La section efficace**

Contrairement aux particules chargées (comme les électrons), entrant en collision avec les atomes du milieu tout au long de leur courte trajectoire et décélérant progressivement, les photons et les neutrons se déplacent sur une longue distance entre deux collisions. Cependant, ils peuvent perdre beaucoup d'énergie en cas de collision. Pour caractériser la probabilité qu'une interaction se produise, on utilise la notion de section efficace  $\sigma$  [5]. En termes simple, imaginez que dans une cible d'épaisseur infinitésimale  $dx$  et de surface  $A$ , chaque noyau présente une certaine surface  $\sigma$ . La probabilité  $dP$  qu'une particule incidente sur la surface  $A$  subisse une interaction en traversant une épaisseur de matière  $dx$  vaut

$$dP = \frac{\sigma N A dx}{A} = \sigma N dx$$

Où  $N$  est la densité de noyaux par unité de volume et  $\sigma$  est la section efficace microscopique.

La section efficace se mesure en unité de surface et  $\sigma$  et l'unité couramment utilisée est le barn.

Il existe plusieurs types de sections efficaces :

- La section efficace de diffusion  $\sigma_s$ .
- La section efficace d'absorption  $\sigma_a$ .
- La section efficace de fission  $\sigma_f$ .
- La section efficace de capture  $\sigma_c$ .



***CHAPITRE II :***  
***DESCRIPTION D'UN***  
***REACTEUR NUCLEAIRE***

### **1/ Histoire des réacteurs nucléaires**

Les principales étapes qui ont ouvert la voie au développement de l'industrie nucléaire sont :

- 1932 Découverte du neutron par J. Chadwick (prix Nobel de Physique en 1935) qui a répété les expériences du couple Joliot-Curie (prix Nobel de Chimie en 1935).
- 1934-38 plusieurs équipes (E. Fermi, O. Hahn, Joliot-Curie) travaillent en parallèle sur les réactions nucléaires.
- 1938 la réaction de fission est mise en évidence par O. Hahn, F. Strassmann, et L. Meitner qui identifient les produits de fission.
- Le premier réacteur nucléaire a été construit en 1942, aux États-Unis. Six ans plus tard, un réacteur similaire fonctionne pour la première fois en France
- 1942 la réaction en chaîne est démontrée par E. Fermi et son équipe à Chicago. La pile est constituée d'Uranium naturel (50 t) et de graphite (385 t) (et de barres en Cadmium).
- 1945 la séparation et la purification des isotopes fissiles permet aux USA de réaliser deux essais nucléaires : Little Boy (Uranium) à Hiroshima et Fat Man (Plutonium) à Nagasaki.
- 1948 Divergence de la pile Zoé (Uranium et eau lourde) sous la direction de F. Joliot (CEA, Fontenay aux Roses).
- Les premiers réacteurs électronucléaires ont été construits au cours des années 1950 aux États-Unis 1942, en Union Soviétique 1954 et en France 1956. Depuis, plusieurs générations de réacteurs sont apparues à travers le monde.
- Les premiers réacteurs nucléaires furent développés pour la production militaire de Plutonium. Ensuite des réacteurs furent développés pour la propulsion navale et la production d'électricité : 1953 discours Atoms for peace du président Eisenhower aux Nations Unies : serve the needs rather than the fears of humanity.
- 1954 lancements du Nautilus, premier sous-marin à propulsion nucléaire (USA).
- 1954 première connexion au réseau électrique d'un réacteur nucléaire : Obninsk, URSS, 5 MW. 1956 premier réacteur commercial (et plutonigène) : Calder Hall, Grande Bretagne, 60 MW.
- 1956 Mise en service du premier réacteur UNGG : Marcoule, 2 MW.
- 1957 premier réacteur commercial à eau légère (exclusivement électrogène) : Shippingport, USA, 60 MW. La première génération des réacteurs nucléaires est ainsi

constituée par des réacteurs utilisant de l'Uranium naturel et dont la puissance reste limitée (200 MW).

- 1950-1970 durant cette période les premiers développements de surgénérateurs à spectre neutronique rapide refroidis au sodium. Enrico Fermi en 1963 (USA), Rapsodie en 1967 (France), BOR-60 en 1968 (Union Soviétique), ainsi que Joyo en 1970-2000. Il s'agit des réacteurs commerciaux déployés depuis les années 1970 (suite à la première crise du pétrole, OPEP en 1974) et qui sont toujours en service aujourd'hui. Ce sont les réacteurs à eau légère (LWR) dont les deux grandes familles sont les réacteurs à eau (BWR) et les réacteurs à eau pressurisée (PWR) [6].
- 1962-1987 Le premier PWR en Europe occidentale était BR3 à Mol. Belgian Reactor3, Westinghouse.
- 1977-2010 développement du concept SFR et perspectives
- 2006, le comité de l'énergie atomique a orienté les acteurs industriels français vers les réacteurs à neutrons rapides.
- 2008, il y avait de nombreux chantiers nucléaires dans le monde : un total de 41 nouvelles centrales était en construction dans 15 pays.
- 2008-2012 études et recherche, discussions avec LASN et l'IRSN.
- Les premiers enseignements des événements survenus au mois de mars 2011 à la centrale de Fukushima-Daichi sont également pris en compte systématiquement dans l'analyse de l'IRSN.
- 2011 le réseau électrique SFR chinois CEFR (Experimental Fast Reactor), Ce réacteur est le fruit d'une collaboration étroite entre la Chine et divers instituts nucléaires russes.
- La filière SFR apparaît dans un état de maturité permettant d'envisager à moyen terme (2020-2030) la réalisation d'un nouveau prototype industriel. Plusieurs projets sont en cours, avec un degré d'avancement variable [7].

### **2/ Description d'un réacteur nucléaire**

Un réacteur nucléaire est un appareil et une installation industrielle dans lequel une réaction nucléaire en chaîne est initiée et par la suite contrôlée. Bien que plusieurs modèles de réacteurs nucléaires aient été développés au cours des années pour étudier et tirer profit de la fission et de la fusion nucléaire, seuls les réacteurs à fission sont réellement d'intérêt dans le cadre de ce travail puisqu'ils sont utilisés pour la production d'électricité nucléaire.

Le principe essentiel de production d'électricité dans un réacteur repose sur les réactions de fission en chaîne et d'en contrôler leurs intensités [8]

Un réacteur nucléaire comporte schématiquement deux parties : un « îlot nucléaire » dans lequel la fission nucléaire produit de la chaleur, et un « îlot conventionnel » où cette chaleur est transformée en courant électrique (voir figure 3).

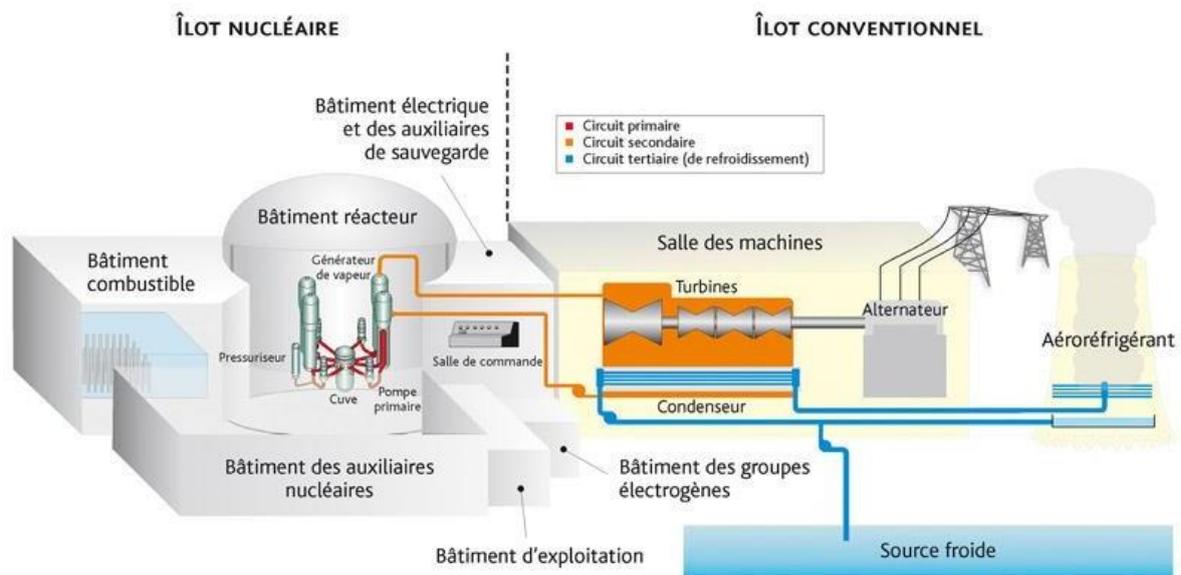


Figure 3: Présentation générale d'un réacteur à eau sous pression et de ses principaux circuits

### 3/ Composants d'un réacteur

Il existe de nombreuses filières de réacteurs nucléaires.

Toutefois, ces réacteurs ont tous en commun plusieurs composants tels que le combustible, les barres de commande, le modérateur et le caloporteur :

- Un combustible dans lequel se produit la fission.
- Un moyen de contrôle de la réaction en chaîne. Il en existe deux types :
  - Des barres de commande constituées de matériaux absorbant les neutrons que l'on fait plus ou moins rentrer dans le cœur du réacteur.
  - Des corps dissous dans l'eau dont on peut faire varier la concentration au cours du temps (par exemple du bore sous forme d'acide borique).

- Un modérateur (sauf pour les réacteurs à neutrons rapides) qui permet de ralentir les neutrons afin de contrôler la réaction en chaîne.
- Un fluide caloporteur, liquide ou gazeux, qui transporte la chaleur hors du cœur du réacteur pour ensuite actionner une turbine (turboalternateur) permettant la production d'électricité.

### **3.1 Le combustible**

Le combustible nucléaire est un matériau ayant une capacité de fission suffisante pour atteindre une masse critique. Autrement dit, pour maintenir une réaction nucléaire en chaîne. Il est positionné de manière à ce que l'énergie thermique qui produit cette réaction atomique puisse être rapidement extraite.

Le combustible d'une centrale nucléaire contient des atomes fissiles dont on va extraire de l'énergie par fission. Celui le plus souvent utilisé est l'uranium 235. Comprimé en pastilles, le combustible est inséré dans des gaines étanches, appelées « crayons combustible ». Ces derniers sont ensuite réunis en faisceaux dans des assemblages de combustible (voir figure 4), chaque assemblage combustible comporte 264 crayons combustibles, 24 tubes pouvant contenir les crayons d'une grappe de commande et un tube d'instrumentation, placés dans le cœur du réacteur [9].

Les crayons combustibles : d'une hauteur approximative de 4 mètres (variable selon la puissance du réacteur), sont constitués de tubes en alliage de zirconium, appelés aussi gaines. La gaine des crayons combustibles constitue la première des trois barrières de sûreté qui empêche la dispersion des produits radioactifs contenus dans le combustible.

A l'intérieur des crayons sont empilées des pastilles de 8 mm de diamètre de dioxyde d'uranium ( $UO_2$ ) ou d'un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium ( $U Pu$ )  $O_2$ , qui constituent le combustible nucléaire. Le combustible est renouvelé partiellement lors des arrêts programmés du réacteur dont la périodicité varie entre 12 et 18 mois [10].

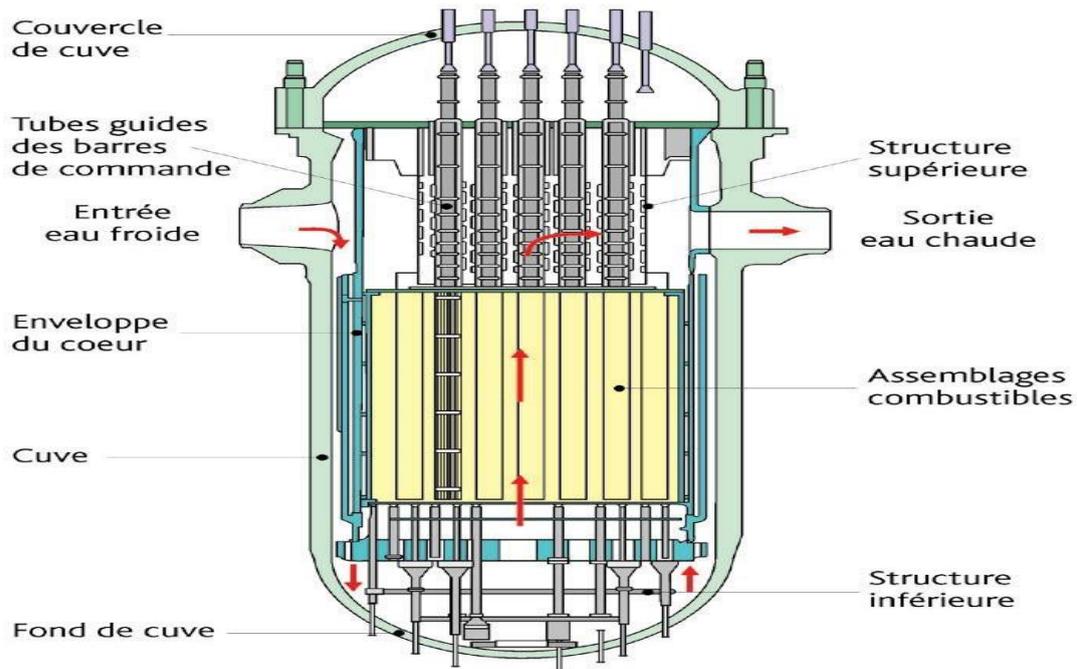


Figure 4: schéma d'un combustible

### 3.2 Les barres de commandes

Dans un réacteur, le contrôle permanent de la réaction en chaîne est assuré grâce à des barres de commande (voir figure 5), également appelées barres de contrôle, faites d'un matériau capable d'absorber les neutrons (Ce matériau peut être du carbure de bore ou des alliages d'argent, d'indium et de cadmium) et ont généralement les mêmes dimensions que les éléments combustibles. Ces barres sont mobiles dans le cœur du réacteur : elles peuvent être descendues pour réduire le taux de fission, remontées pour le maintenir ou l'augmenter, réguler la puissance du réacteur et contrôler la fréquence des réactions nucléaires. En cas d'incident, la chute de ces barres au sein du combustible stoppe presque instantanément la réaction en chaîne, qui est souvent l'élément essentiel et le plus important de la sûreté des réacteurs. Sans eux, la puissance du cœur du réacteur augmenterait de manière incontrôlable, son efficacité dépend de la proportion des barres qui sont en contact avec la zone de réaction, plus il est dans le cœur du réacteur, plus il absorbera des neutrons et donc moins il y aura de réactions.

Dans les réacteurs à eau sous pression dont on parle plus tard, les barres sont suspendues dans le réacteur et peuvent fonctionner comme un système de sécurité. Les montées sont maintenues avec un électroaimant et en cas de perte imprévue de la puissance électrique, elles tombent

automatiquement dans le réacteur. Ainsi, les réactions de fission nucléaire en chaîne sont arrêtées.

Dans d'autres types de réacteurs, tels que le réacteur à eau bouillante, les tiges dépassent du fond dans le réacteur. Pour s'activer, elles doivent être activement poussées dans le cœur du réacteur [11].



Figure 5: les barres de commande d'une centrale nucléaire

### **3.3 Le modérateur**

La plupart des réacteurs comportent ce que l'on appelle un modérateur (figure 6). Il est situé dans le cœur du réacteur. Son rôle est de ralentir et réduire la vitesse des neutrons libérés lors de la fission nucléaire, trop énergétiques pour provoquer efficacement une nouvelle fission. Les neutrons sont freinés lorsqu'ils traversent une matière composée d'atomes à noyaux légers qui ne les absorbe pas, comme de l'eau ou du graphite par exemple. Au final, cela permet de les ralentir, les faisant passer d'une vitesse initiale de l'ordre de 20 000 km/s à une vitesse d'environ 2 km/s.

Généralement, il s'agit d'hydrogène, de deutérium (présent dans l'eau lourde) ou de carbone. Il est important que le modérateur n'absorbe pas les neutrons car nous voulons seulement

réduire la vitesse, pour cela, les matériaux de modérateur utilisés doivent avoir une section efficace de capture faible [12].

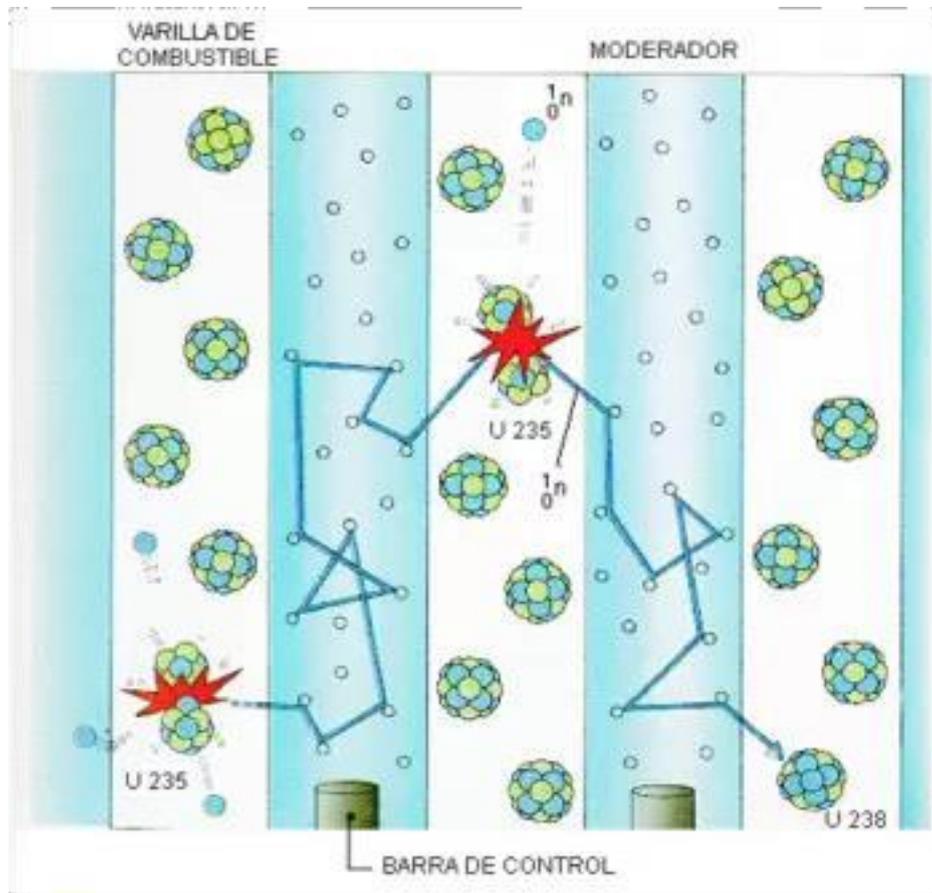


Figure 6: schéma d'un modérateur

### 3.4 Le caloporteur (Transporteur de chaleur)

L'énergie libérée sous forme de chaleur lors de la fission des noyaux d'uranium 235 doit être transportée hors du cœur du réacteur vers les systèmes qui transformeront cette chaleur en électricité : turbine, alternateur est évacuée de façon continue vers les circuits d'utilisation, Si cette évacuation venait à faire défaut, la température augmenterait rapidement au niveau des crayons de combustibles et elle peut atteindre la température de fusion de l'oxyde d'uranium (2600°C). Ainsi la puissance évacuée au réacteur est trois fois plus élevée que celle produite par la centrale. Ce rôle est assuré par le caloporteur, ce dernier s'échauffe au contact du combustible chauffé par les fissions. Celui-ci peut être de l'eau, un métal liquide (sodium ou plomb) ou un gaz (gaz carbonique ou hélium).

## ***CHAPITRE II : DESCRIPTION D'UN REACTEUR NUCLEAIRE***

---

Ce rôle d'extraction est assumé par le fluide caloporteur. Celui-ci doit présenter les qualités suivantes :

- il ne doit pas trop absorber les neutrons, de manière à éviter qu'une fraction importante de ceux-ci soit perdue pour l'entretien de la réaction en chaîne.
- il doit avoir une chaleur spécifique élevée étant donné les fortes densités de puissance à évacuer.
- il doit être inerte sur le plan chimique (être peu corrosif) et s'activer aussi peu que possible. Parmi les caloporteurs liquides, on utilise l'eau ordinaire ( $H_2O$ ) et l'eau lourde ( $D_2O$ ) (pour lesquelles des filières importantes ont été développées).

Les fluides caloporteurs gazeux utilisés sont, le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et l'hélium ( $He$ ) [13].

### **4/ Fonctionnement**

Les noyaux de certains isotopes contenus dans le combustible nucléaire, tels que  $^{235}U$  et le  $^{239}Pu$ , peuvent être scindés par fission en deux fragments plus petits appelés produits de fission. Ces fragments ont une grande énergie cinétique qui se dégage principalement sous forme d'énergie cinétique d'agitation thermique dans le matériau combustible environnant. Ce dégagement d'énergie est utilisé dans les réacteurs de puissance pour produire de l'électricité. La réaction de fission en deux fragments peut se produire soit sous l'action de neutrons (on parle de « fission induite »), soit spontanément pour les isotopes de masse élevée (on parle alors de « fission spontanée »). La fission est accompagnée de la production de deux à trois neutrons par fission dont certains peuvent soit conduire, à leur tour, à d'autres fissions (c'est le principe de la réaction en chaîne) soit être absorbés dans le combustible sans induire de fission nucléaire, soit s'en échapper.

Les neutrons produits par fission à partir des neutrons d'une génération constituent une nouvelle génération de neutrons. Le facteur d'efficacité multiplicatif des neutrons,  $K$  [14] où cette constante présente le nombre moyen de neutrons émis par les fissions qui vont engendrer une nouvelle génération, la réaction en chaîne est maintenue dans le cœur de la réaction si le nombre de neutrons produits par les fissions des atomes lourds est égal au nombre de neutrons qui disparaissent (par exemple absorbés par l'uranium 238). Le rapport de ces deux nombres (production divisée par disparition) est appelé coefficient de multiplication (ou « criticité »)  $K$  et doit être égal à 1. Une autre grandeur est aussi utilisée pour traduire l'écart du système par rapport à l'état critique, il s'agit de la

## ***CHAPITRE II : DESCRIPTION D'UN REACTEUR NUCLEAIRE***

---

réactivité  $\beta$ ,  $\beta = 1 - 1/K$ . Les valeurs de  $\beta$  positives correspondent à des états « sur critique » et les valeurs négatives à des états « sous critique ».

- La valeur de  $K$  et  $\beta$  gouvernent l'évolution de la réaction en chaîne :
  - Si  $K < 1$ ,  $\beta < 0$  le système est dit « sous-critique », le système ne peut pas entretenir une réaction en chaîne car les neutrons disparaissent plus vite qu'ils sont produits et cette réaction va finir par s'éteindre.
  - Si  $K=1$ ,  $\beta =0$  le système est dit « critique », C'est-à-dire qu'il apparait autant de neutrons qu'il en disparaît, la réaction est exactement entretenue. Cette situation conduit à un niveau de puissance produite constant.
  - Si  $K>1$ ,  $\beta >0$  le système est dit « sur- critique », le nombre de neutrons présents dans le cœur va augmenter très rapidement, ce qui entrainera une augmentation du nombre de fission et de l'énergie dégagée. La réaction en chaîne va donc s'emballer.

La réactivité du cœur est ainsi contrôlée par des dispositifs d'insertion de poisons neutroniques, actionnés par un système de contrôle-commande.

Au début d'un cycle de fonctionnement, le cœur présente une réserve d'énergie très importante. Celle-ci diminue progressivement pendant le cycle au fur et à mesure que disparaissent les noyaux fissiles. La réaction en chaîne, et donc la puissance du réacteur, est maîtrisée par :

- L'introduction plus ou moins profonde dans le cœur de dispositifs appelés « grappes de commande », qui contiennent des éléments absorbant les neutrons. Elle permet de démarrer et d'arrêter le réacteur et d'ajuster sa puissance à la puissance électrique que l'on veut produire. La chute des grappes par gravité permet l'arrêt automatique du réacteur.
- la teneur en bore (absorbant les neutrons) de l'eau du circuit primaire qui est ajustée pendant le cycle en fonction de l'épuisement progressif du combustible en matériau fissile.

En fin de cycle, l'énergie dégagée par le cœur est transportée par le circuit primaire, le circuit secondaire et aussi le circuit de refroidissement sous forme de chaleur jusqu'au groupe turbo-

alternateur qui assure la production d'électricité et le refroidissement [15]. Ces circuits sont décrits ci-dessous :

### **- Circuit primaire**

Dans le réacteur, la fission des atomes d'uranium produit une grande quantité de chaleur. Cette chaleur fait augmenter la température de l'eau qui circule autour du réacteur, l'eau est maintenue à l'état liquide sous une pression d'environ 150 bars pour l'empêcher de bouillir. Ce circuit fermé est appelé circuit primaire est composé de boucles de refroidissement dont le rôle est d'extraire la chaleur dégagée dans le cœur par circulation d'eau sous pression à une température d'environ 300 °C.

### **- Circuit secondaire**

Le circuit primaire communique avec un deuxième circuit fermé, appelé circuit secondaire par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Dans ce générateur de vapeur, l'eau chaude du circuit primaire chauffe l'eau du circuit secondaire qui se transforme en vapeur. La pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes très haute tension.

### **- Circuit de refroidissement**

Selon le modèle de réacteur, l'eau peut être ensuite rejetée à la source à une température légèrement plus élevée (réacteur sans aéroréfrigérant figure 7), ou bien refroidie dans un aéroréfrigérant puis réinjecté dans le circuit de refroidissement (figure 8)

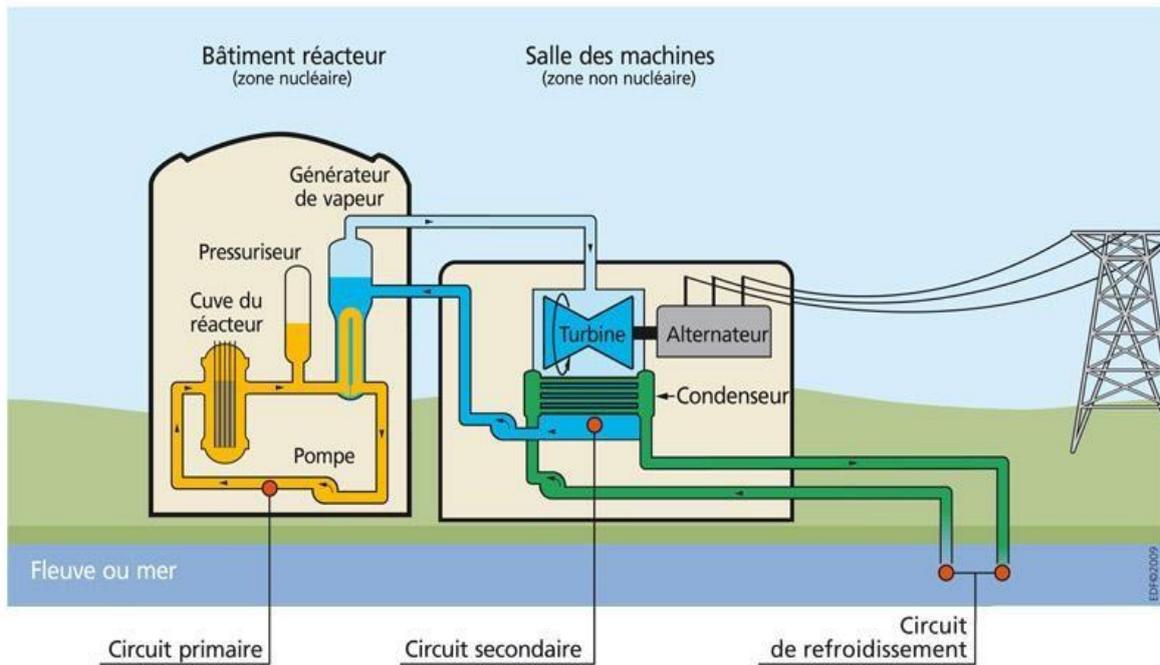


Figure 7: Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire sans aéroréfrigérant

À la sortie de la turbine dans le cas d'un réacteur nucléaire avec aéroréfrigérant, la vapeur du circuit secondaire est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur, échangeur thermique composé de milliers de tubes dans lesquels circule l'eau froide provenant du milieu extérieur (mer, rivière ou un fleuve) ou d'un circuit de réfrigération atmosphérique. Au contact de ces tubes, la vapeur se condense et peut être renvoyée sous forme liquide vers les générateurs de vapeur. L'eau du circuit de refroidissement échauffée dans le condenseur est ensuite soit rejetée dans le milieu (circuit ouvert), lorsque le débit de la rivière est trop faible ou l'échauffement trop important par rapport à la sensibilité du milieu, refroidie au contact de l'air circulant dans de grandes tours, appelées **aéroréfrigérants**. (Circuit-fermé ou semi-fermé). Ce dernier est une tour creuse en son centre dans laquelle se crée, naturellement, un courant d'air entrant en partie basse et sortant en partie haute. Au passage, ce courant d'air prélève la chaleur contenue dans l'eau du circuit de refroidissement et la disperse dans l'atmosphère sous forme de nuage de vapeur d'eau. Pour remplacer ce volume de vapeur d'eau dispersé dans l'atmosphère, un prélèvement équivalent est réalisé depuis le fleuve. L'opération est reproduite en permanence. Les 3 circuits d'eau sont étanches les uns par rapport aux autres.

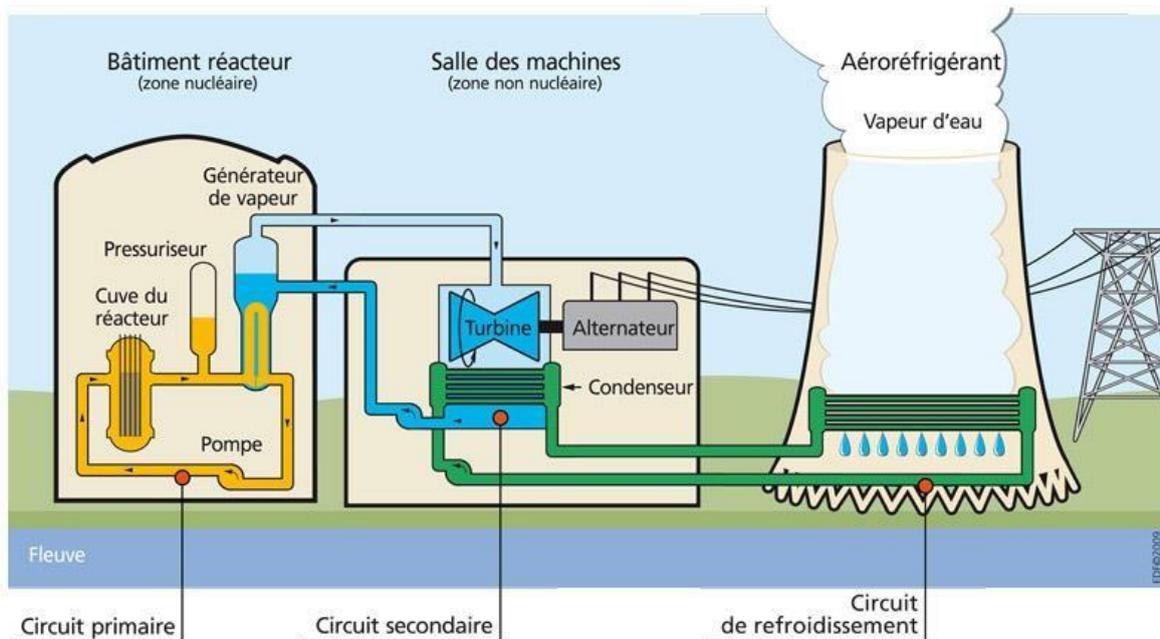


Figure 8: Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire avec aéroréfrigérant

## 5/ Les applications

### 5.1 Production de chaleur

La plus grande partie de l'énergie primaire est actuellement consommée dans le monde sous forme de chaleur utilisée par les différentes branches de l'industrie ou pour le chauffage urbain. D'une façon générale, la chaleur est utilisée à deux niveaux de température :

- La chaleur à basse température, sous forme d'eau chaude ou de vapeur de basse qualité pour le chauffage urbain, le dessalement, et d'autres fins.
- La chaleur à haute température, comprenant la vapeur utilisée à des fins industrielles (production de l'aluminium, industrie chimique) ou la chaleur à haute température utilisée pour la conversion des combustibles fossiles, la production d'hydrogène. [16].

### 5.2 Production de plutonium

Essentiellement à usage militaire (bombe atomique) ou à usage civil (combustible MOX, bien qu'actuellement, seul du plutonium de retraitement soit utilisé dans la fabrication de ce type de combustible) [17].

### **5.3 Production de neutrons libres ou d'isotopes radioactifs**

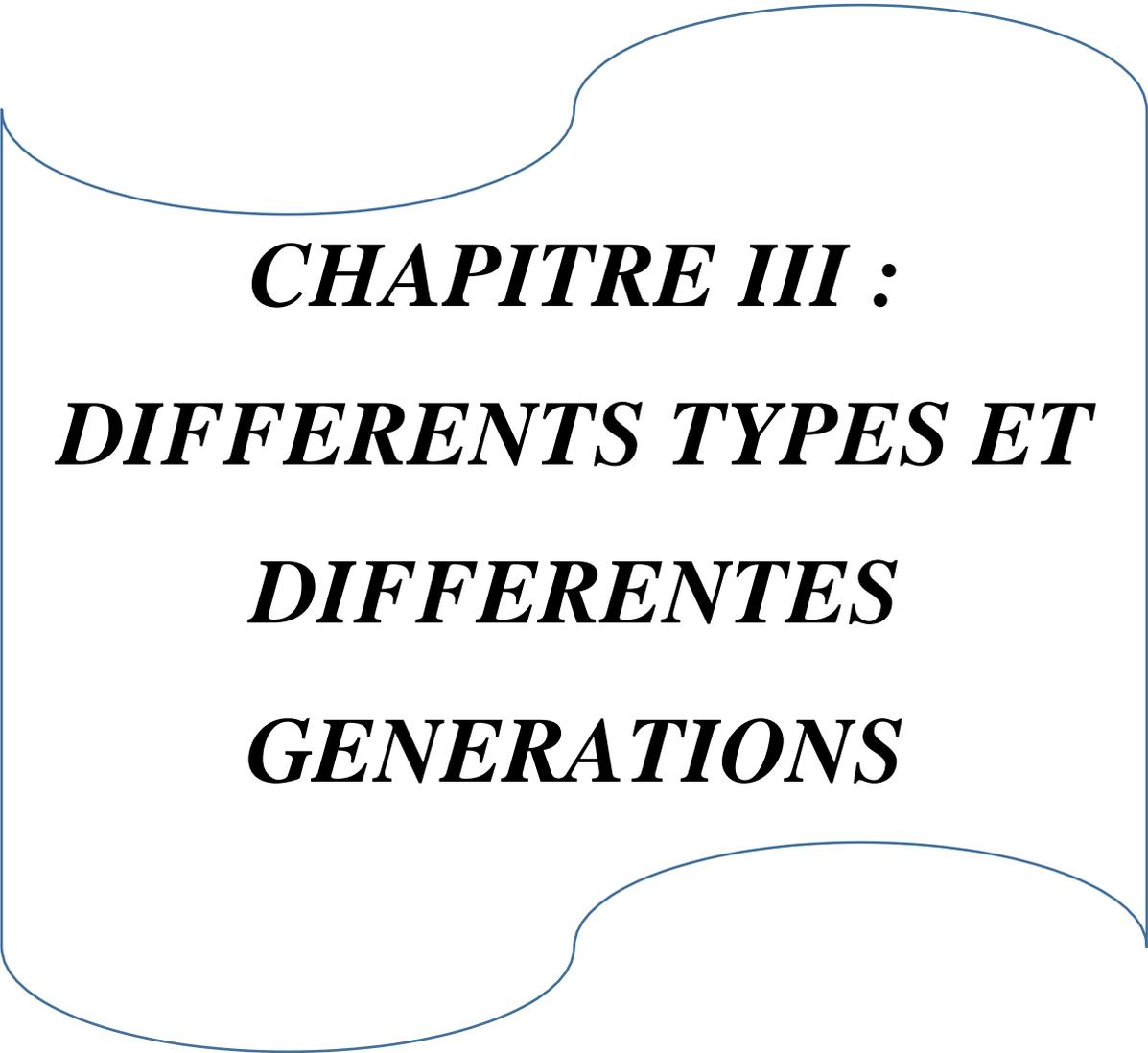
Utilisés pour la recherche et en médecine nucléaire (réacteurs de recherche).

Les principales applications sont la production d'électricité et secondairement la propulsion nucléaire, porte-avion...) ou civils (Médecine, brise-glace notamment) [18].

### **5.4 Production d'électricité**

La production d'électricité d'origine nucléaire est développée plus largement à partir de 1974, au lendemain du 1<sup>er</sup> choc pétrolier, révélateur de la dépendance énergétique du pays vis-à-vis des hydrocarbures.

En 2021 l'énergie nucléaire contribue pour environ 10% à la production mondiale d'électricité sur les 33 pays qui exploitent des centrales nucléaires dans le monde entier, 13 dont la Suisse, couvrent plus d'un quart de leurs besoins en électricité avec des centrales nucléaires. Sur les 36 nations de l'OCDE (Organisation for Economic Co-operation and development), 18 produisent de l'électricité via de telles centrales. Dans ces pays, la part de l'énergie nucléaire est en moyenne, d'un peu moins de 30%. En 2020, ce sont les Etats-Unis qui ont produit le plus d'électricité nucléaire avec 94 installations (deux sont en construction), devant la France (56 réacteurs), la Chine (49 réacteurs) et la Russie (38 réacteurs) [19].



***CHAPITRE III :***  
***DIFFERENTS TYPES ET***  
***DIFFERENTES***  
***GENERATIONS***

## **1/ Les différents types de réacteur**

Depuis les premiers réacteurs en 1942, il a vu différentes évolutions, d'après ces améliorations il existe plusieurs types de réacteurs

### **1.1 Réacteur à eau légère**

**1.1.1 Réacteur à eau sous pression (PWR/EPR) :** Le réacteur EPR est un réacteur à eau sous pression qui s'appuie sur une conception « **Évolutionnaire** » par rapport aux réacteurs, l'eau sous pression (donc à l'état liquide) est à la fois le caloporteur et le modérateur (voir figure 9). Donc les réacteurs à eau sous pression utilisent comme fluide de transfert de la chaleur, de l'eau ordinaire sous une pression suffisamment élevée pour rester liquide (155 bars) à sa température de fonctionnement (300 °C).

Le combustible utilisé est de l'uranium enrichi. Il est caractérisé par :

- Cycle indirect : deux circuits séparés pour réfrigérer le cœur et pour alimenter les turbines.
  - Primaire haute pression (15.5 MPa), monophasique liquide.
  - Secondaire moyenne pression (7-8 MPa), diphasique liquide-vapeur.
- GV échangeur thermique entre les deux circuits (3 ou 4 GV par réacteur).
- Tertiaire basse pression et température, circuit ouvert sur la source froide.
- Barrières trois barrières de confinement de la radioactivité (gaine du combustible, circuit primaire, enceinte).

Les principales caractéristiques du cœur sont : assemblages section carrée, hauteur voisine de 4 m,  $150 < \text{nombre} < 200$ .

Réactivité contrôlée assurée par du bore soluble et des barres de contrôle.

Ce type de réacteur est le plus répandu dans le monde, représentant environ 55 % des réacteurs installés [20].

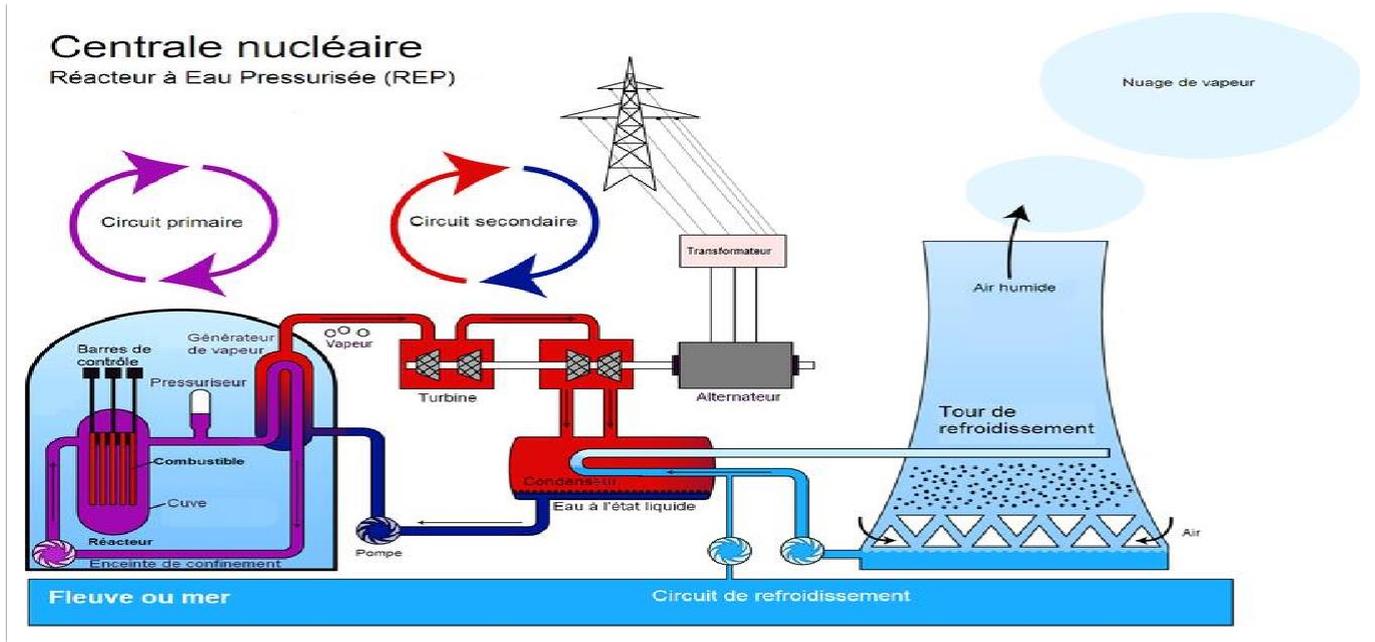


Figure 9: schéma général d'un réacteur à eau sous pression

### 1.1.2 Les réacteurs à eau bouillante ou REB

Cette technologie se retrouve dans environ un quart des réacteurs nucléaires en service dans le monde (Japon, Etats-Unis, Allemagne, Suisse, Suède, Finlande...). Si les REB utilisent le même combustible que les REP, l'uranium enrichi, ces réacteurs présentent une différence notable : ils n'ont pas de circuit secondaire mais un circuit unique où l'eau, non pressurisée, est à la fois chauffée et transformée en vapeur (voir figure 10).

Le Réacteur à Eau Bouillante (REB) est caractérisé par :

- Cycle direct un seul circuit pour réfrigérer le cœur et pour alimenter les turbines.
- Caloporteur moyenne pression (7-8 MPa) assurée par la turbine, diphasique liquide-vapeur.
- Pilotage couplé puissance-débit, ce qui permet facilement le suivi de charge.
- Barrières la seconde barrière de confinement est dynamique (vannes admission turbine).

L'eau est aussi le caloporteur, mais elle n'est plus pressurisée. À pression atmosphérique ambiante, elle devient bouillante. Le combustible utilisé est de l'uranium enrichi.

Ce type de réacteur représente 22 % des réacteurs installés dans le monde [21].



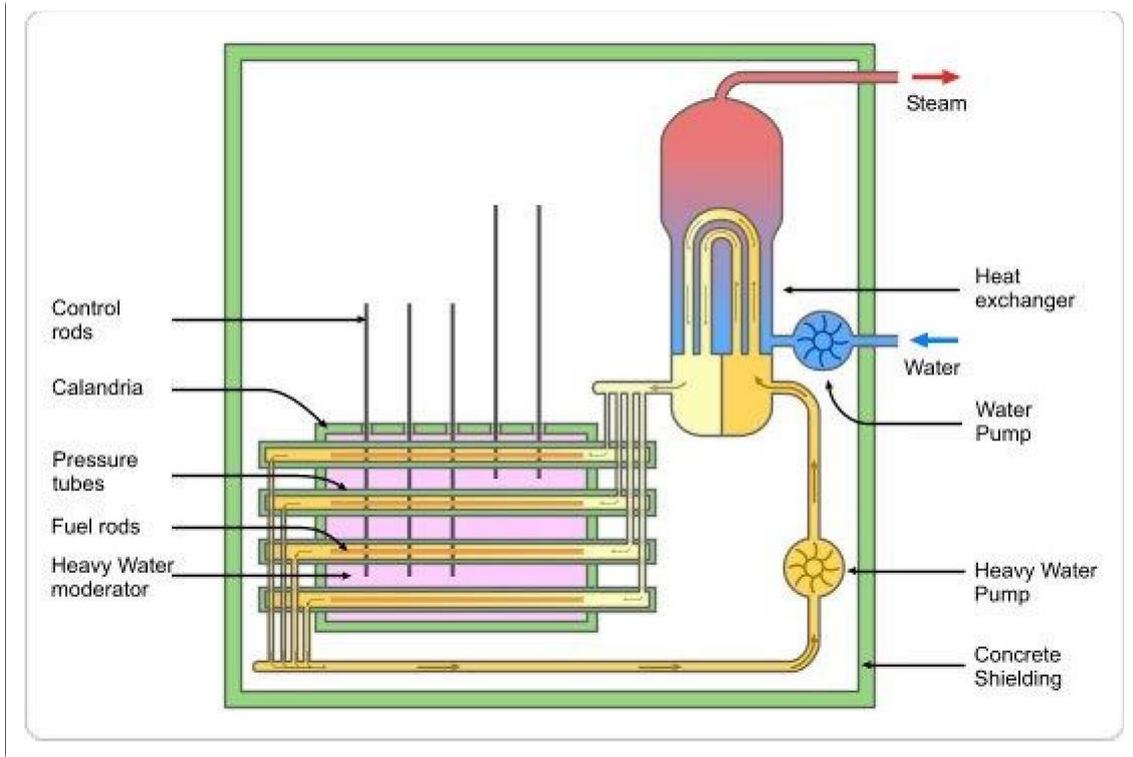


Figure 11: schéma général d'un réacteur à eau lourde.

### 1.3 Les réacteurs à neutrons rapides (RNR)

La particularité de ces réacteurs est de ne pas utiliser de modérateur dans le but d'exploiter un combustible hautement enrichi (uranium et plutonium) le plus efficacement possible grâce aux neutrons rapides. Les quelques réacteurs de ce type en activité aujourd'hui se trouvent en Russie et en Chine.

Les réacteurs à neutrons rapides ou RNR ne nécessitent pas de ralentir les neutrons comme dans les réacteurs classiques à eau pressurisée ou à eau bouillante, alors ils ne sont plus nécessaires de modérateur. Leur cœur est 10 fois plus petit que celui d'un réacteur conventionnel à l'uranium, ces réacteurs utilisent principalement du plutonium comme combustible. Avec un combustible enrichi à 15 ou 20 % d'uranium-235 ou de plutonium. Ils peuvent générer de la matière fissile, d'où leur nom de surgénérateurs. L'intérêt des neutrons rapides est qu'ils sont les seuls capables d'extraire la totalité de l'énergie de fission contenue dans l'uranium de la croûte terrestre. Le refroidissement se fait au sodium ou au plomb fondu (projet russe). Ce refroidissement pose un problème de sécurité, notamment avec le sodium, qui réagit violemment à l'air et à l'eau. Néanmoins, un surgénérateur comme PHENIX a fonctionné 40

ans sans accident avant d'être arrêté en 2011 [23]. On présente le schéma d'un réacteur à neutrons rapide dans la (figure12).

En complément de filière à neutrons rapides, des types de réacteurs sont aussi étudié [24].

- **VHTR (Very High Temperature Reactor), réacteur à très haute température**

Les réacteurs à très haute température fonctionnent avec des neutrons thermiques, ils ne sont pas surgénérateurs et donc moins performants en termes de développement durable. Ils tirent leur nom du fait que la température de l'hélium sous pression qui évacue la chaleur dépasse 1000°C, ce qui ouvre la voie à des applications comme la séparation d'hydrogène à partir de l'eau, la gazéification du charbon et autres processus industriels. Bénéficiant d'un très bon rendement de conversion. Ce réacteur refroidi au gaz de ce système peut dépasser 1000°C.

- **SCWR (supercritical Water-cooled Reactor), réacteur à eau supercritique**

Ces réacteurs refroidis à l'eau supercritique (NB : Au-delà du point critique, à très haute pression (218 atmosphères) et au-dessus de 374°C, il n'y a plus de différence entre liquide et vapeur pour l'eau de refroidissement). Ces réacteurs sont étudiés sous deux options : des réacteurs rapides surgénérateurs ou des réacteurs à neutrons lents sans régénération du combustible. Un tel refroidissement offrirait un bon rendement thermique approchant 44 % pour la production d'électricité et l'avantage d'une implantation simplifiée.

- **MSR (Molten Salt Reactor), réacteur à sels fondus**

Les réacteurs à sels fondus sont de conception très différente des autres réacteurs. Le combustible est un liquide, mélange de sels fondus notamment d'uranium et de thorium. Avec un combustible au thorium, les MSR sont surgénérateurs pour tout le spectre des neutrons, ce qui a permis d'étudier différents systèmes. Après des études sur les systèmes thermiques intéressant pour la faible quantité de matière fissile nécessaire mais posant des problèmes de sûreté et de retraitement chimiques, les études portent maintenant sur des systèmes où les neutrons ne sont pas modérés, ce qui permet de résoudre les problèmes précédents et surtout de démarrer avec les actinides produits dans les réacteurs actuels sans passer par la production externe d'une première charge d'uranium 233.

- **GFR (Gas-cooled Fast Reactor), réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz**

Ces réacteurs à neutrons rapides régénèrent aussi leur combustible. Ils sont refroidis par de l'hélium à haute pression. L'hélium est un gaz inerte, qui ne pose pas de problèmes de sécurité et de corrosion. En dehors de la production d'électricité, ils pourraient contribuer à la production d'hydrogène. Les obstacles technologiques sont importants. Un prototype (Allegro) de faible puissance est développé par 4 pays de l'Europe de l'Est (Pologne, Hongrie, Tchéquie, Slovaquie) pour fonctionner vers 2030.

- **SFR (Sodium-cooled Fast Reactor), réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium**

Les réacteurs refroidis au sodium fondu utilisent des neutrons rapides et sont surgénérateurs. Deux options sont envisagées avec des réacteurs de taille intermédiaire ou de gros réacteurs. Le SFR peut être associé à un cycle fermé permettant un recyclage des actinides et un multi-recyclage du plutonium.

- **LFR (Lead-cooled fast Reactor), réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb**

Les réacteurs refroidis au plomb sont également à neutrons rapides et régénèrent leur combustible. Le liquide de refroidissement du plomb fondu ou un mélange eutectique de plomb et de bismuth est moins dangereux chimiquement que le sodium mais pose des problèmes de corrosion. Ces réacteurs bénéficient de l'expérience acquise avec les réacteurs de sous-marins russes, Le LFR dispose d'un atout important : la compatibilité du plomb (et de ses alliages) avec l'eau et l'air. Elle permet par exemple d'envisager de placer les générateurs de vapeur directement dans la cuve primaire [24].

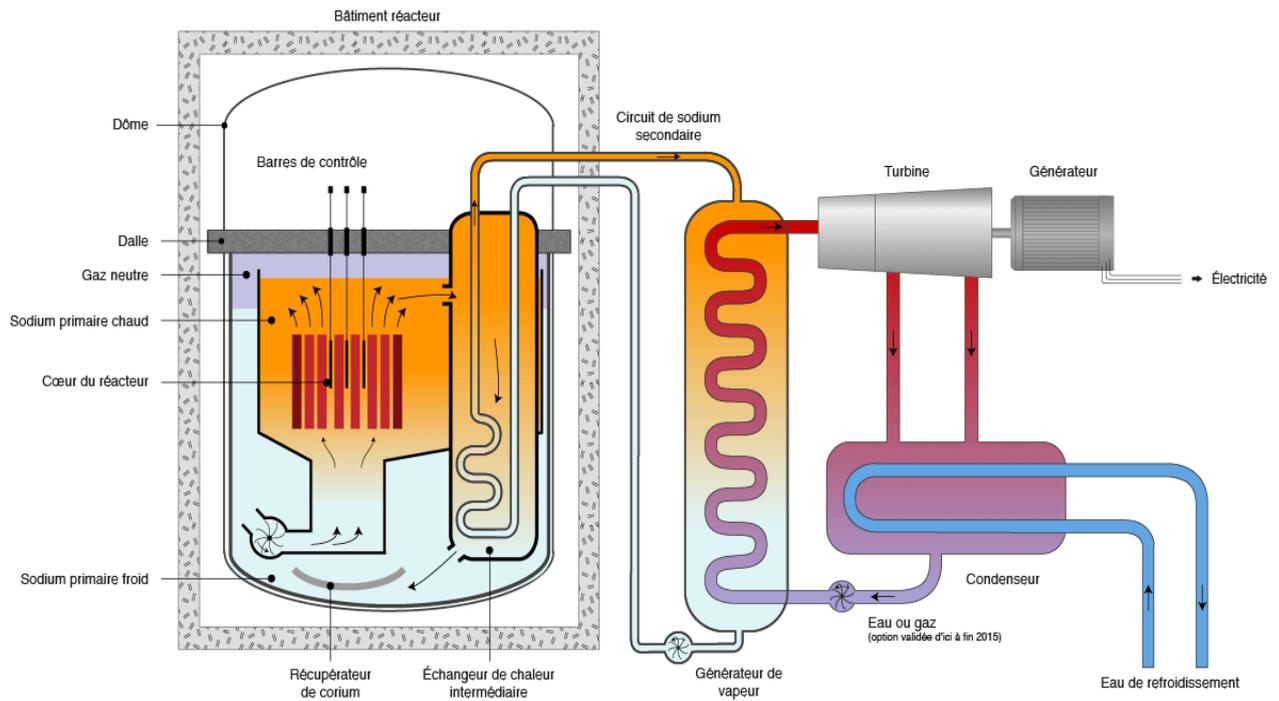


Figure 12: schéma général d'un réacteur à neutrons rapide.

#### 1.4 Les réacteurs caloporteurs gaz (RCG)

Les systèmes à gaz à très haute température est une technologie prometteuse. Le concept de réacteur à gaz à haute température présente des attraits importants pour réaliser l'ensemble des avancées décrites plus haut. Elle utilise de l'hélium comme caloporteur, qui présente des potentialités attractives en cohérence avec les critères assignés aux systèmes de nouvelle génération :

- Economie
- Sûreté et sécurité
- Préservation de l'environnement

Ce gaz alimente directement la turbine sans échangeur intermédiaire alors que le modérateur du réacteur est le graphite, son utilisation comme fluide caloporteur permet d'atteindre un rendement élevé, notamment dans le concept moderne de HTR à cycle directe (l'hélium chauffé va directement au turboalternateur), en utilisant la technologie des turbines à gaz qui a fait des progrès considérables dans la technologie à neutrons rapides. Elle est également compatible avec les conceptions de réacteurs modulaires de plusieurs centaines de mégawatts (100 à 300

**CHAPITRE III : DIFFERENTS TYPES ET DIFFERENTES GENERATIONS DE  
REACTEURS NUCLEAIRES**

---

MWe) et bénéficiant des caractéristiques de sécurité intrinsèquement passives et d'avantages importants la compétitivité économique effective est principalement due à la simplicité des circuits. Les réacteurs à gaz de 4ème génération tirent parti des progrès technologiques et industriels réalisés depuis, notamment le développement de turbines à gaz fonctionnant à température élevée et les matériaux résistants à haute température [25]. Les premiers réacteurs à caloporteur hélium ont été développés dans les années 60-80.

Réacteur Critère	EPR	REB	REL	RCH	RNR
Caloporteur	$H_2O$	$H_2O$	$D_2O$	Hélium	Sodium liquide
Modérateur	$H_2O$	$H_2O$	$D_2O$	Graphite	Pas de modérateur
Combustible	$UO_2$ Enrichi	$UO_2$ Enrichi	$UO_2$ Naturel ou enrichi	$UO_2$ Enrichi ou $PuO_2$	$UO_2-PuO_2$

Tableau 1: Spécifications Techniques de base qualitatives des différents composants d'un réacteur nucléaire.

## **2/ Les générations de réacteurs nucléaires**

Les premiers réacteurs électronucléaires ont été construits au cours des années 1950 aux États-Unis, en Union soviétique et en France. Depuis, plusieurs générations de réacteurs sont apparues à travers le monde, et on en distingue quatre aujourd'hui. Ce classement correspond aux progrès majeurs intégrés dans chaque génération en termes de sûreté de fonctionnement, de sécurité et d'économie du combustible ou encore de compétitivité.

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. 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.

### **2.1 La 1ère génération de réacteurs nucléaires**

La 1ère génération de réacteur nucléaire comprend les prototypes et les premiers réacteurs de taille industrielle à usage commercial mis au point dans les années 1950 principalement en union soviétique, en France, aux Etats-Unis et au Royaume-Unis et 1960 et entrés en service avant les années 1970 conçu dans l'immédiat après la guerre 1939-1945, Ces réacteurs devaient faire la démonstration du potentiel de la puissance atomique mise au service de l'énergie civile. En l'absence de technologie industrielle d'enrichissement de l'uranium, Ces réacteurs utilisent de l'uranium naturel comme combustible (UNGG). Cela permettait aussi de produire du plutonium pour l'armement [26].

Les réacteurs de la 1ère génération

- Magnox (Grande-Bretagne).
- Uranium naturel graphite gaz (UNGG),
- Réacteur à eau lourde refroidi au gaz (HWGCR), Chooz A (PWR) (France).

## **2.2 La 2ème génération de réacteurs nucléaires**

La deuxième génération représente l'écrasante majorité des réacteurs en exploitation. Les centrales suisses appartiennent à cette catégorie, Fukushima aussi. Elle est entrée en service à partir des années 1970, améliorant la compétitivité du secteur sur fond de crise pétrolière. Ce fut l'essor des réacteurs à eau bouillante ou pressurisée fonctionnant désormais à l'uranium enrichi, ces réacteurs nucléaires correspondaient à la nécessité d'une meilleure compétitivité de l'énergie nucléaire et d'une amélioration de l'indépendance énergétique, environ 85 % de l'électricité d'origine nucléaire produite dans le monde provient de réacteurs dits de seconde génération, héritiers des prototypes des années 1950-1960. Ils constituent la grande majorité des quelques 439 unités déployées aujourd'hui et développaient en 2008 une puissance électrique totale de 372 GWe, dans un contexte de fortes tensions sur le cours des énergies fossiles (choc pétrolier). En France, il s'agit principalement de filière à eau sous pression, une technologie américaine adaptée par EDF. Des prototypes de réacteurs à neutrons rapides (RNR) ont également été construits en France sur cette période. Ils répondaient aux mêmes objectifs, mais le ralentissement du développement du nucléaire dans les années 1980, ajouté à la découverte de nouveaux gisements d'uranium, les ont rendus moins prioritaires.

Ces réacteurs sont répartis dans 30 pays (93% de Génération II et 7% de Génération I), accumulant au total une expérience de plus de 13600 années-réacteurs [27]. Ils nécessitent de ralentir les neutrons. Le milieu ralentisseur appelé modérateur est généralement de l'eau.

### Les réacteurs de 2ème génération

- Réacteur de grande puissance à tubes de force (RBMK) : réacteur à eau bouillante, modéré au graphite, de conception soviétique.
- Réacteur à eau bouillante (REB).
- Réacteur à eau pressurisée (REP ou PWR).
- Réacteur VVER (ou WWER) réacteur à eau pressurisée de conception soviétique.
- Réacteur CANDU : réacteur nucléaire à l'uranium naturel et à eau lourde conçu au Canada.

### **2.3 La 3ème génération de réacteurs nucléaires**

Les tout premiers réacteurs de génération III sont en cours de construction. Le projet le plus avancé est celui de la compagnie française Areva, sur l'île d'Olkiluoto, en Finlande, ces réacteurs de troisième génération sont des réacteurs évolutionnaires intégrant dès la conception le retour d'expérience des réacteurs de deuxième génération conçus dans les années 1970 ainsi la prise en compte des accidents nucléaires majeurs (Three Miles Island, Tchernobyl) puis des attentats terroristes du 11 septembre 2001 a conduit à concevoir une nouvelle génération de réacteurs nucléaires plus sûre visant une meilleure acceptabilité sociétale tout en garantissant une amélioration des performances économiques. Sur la base de ces principes, plusieurs modèles de réacteurs de cette nouvelle génération dite 3 ont été développés ou sont en cours de développement, Trois réacteurs répondent à ces critères : l'EPR (european pressurized reactor) français, l'AP1000 (advanced pressurized de 1 000 MWe) américano-japonais et l'AES 2006, dernier modèle de 1 200 MWe du VVER russe [28]. Ces réacteurs sont censés offrir une meilleure sécurité, notamment grâce à une double enceinte de confinement avec système de filtration pour réduire les risques de fuite. Une sorte de « cendrier » est en outre placé sous la cuve du réacteur. En cas d'accident, si le matériel en fusion venait à percer la paroi, ce dispositif devrait permettre de le récupérer et de le stabiliser. Enfin, des systèmes de sécurité « passifs » doivent être capables d'arrêter le réacteur sans électricité ni intervention humaine.

Par conséquent, la conception du réacteur vise à atteindre un niveau Une sécurité nettement améliorée en adoptant une approche basée sur trois piliers Principaux :

- Une réduction de la probabilité d'accident avec fusion du cœur dit accident grave, à une probabilité inférieure à  $10^{-5}$  par réacteur et par an toutes causes confondues, soit une probabilité 10 fois plus faible que celle relative à la génération 2.
- Une réduction de l'impact sur la population en cas d'accident grave par la prise en compte de ces accidents dès la conception et la mise en place de systèmes dédiés pour en limiter les conséquences, notamment le risque de rejets radioactifs vers l'environnement.

### **CHAPITRE III : DIFFERENTS TYPES ET DIFFERENTES GENERATIONS DE REACTEURS NUCLEAIRES**

---

- Un renforcement de la protection contre les agressions externes (chutes d'avion, séisme, inondation, malveillance...).

Parmi les réacteurs de la 3ème génération on cite :

- ABWR II (GE/Hitachi/Toshiba, Japon).
- ACR-700 (Canada).
- AP600, APR1400 (Corée).
- APWR+ (Mitsubishi, Japon).
- CAREM (argentine).
- EPR (Areva/Siemens, France/ Allemagne),
- PBMR (Chine, etc..).
- SWR-1000 (maintenant Kerena Areva, France/Allemagne).

#### **2.4 La 4ème génération de réacteurs nucléaires**

Dans un contexte de croissance constante de la demande énergétique et de réchauffement climatique, l'énergie nucléaire, présente un certain nombre d'avantages.

C'est pourquoi, depuis 2001, une dizaine de pays, au travers notamment du Forum international Génération IV [29], ont décidé de mettre en commun leurs efforts pour développer une nouvelle génération de systèmes nucléaires caractérisés par :

- Un niveau de sûreté accru.
- Une meilleure compétitivité économique.
- Une aptitude à recycler le combustible afin de valoriser les matières fissiles. (Uranium, Plutonium), Sûreté et fiabilité.
- Minimiser par transmutation la production de déchets à vie longue (actinides mineurs), et réduire la charge de leur gestion à long terme.
- Réduire l'impact environnemental et favoriser l'utilisation efficace des ressources.

### ***CHAPITRE III : DIFFERENTS TYPES ET DIFFERENTES GENERATIONS DE REACTEURS NUCLEAIRES***

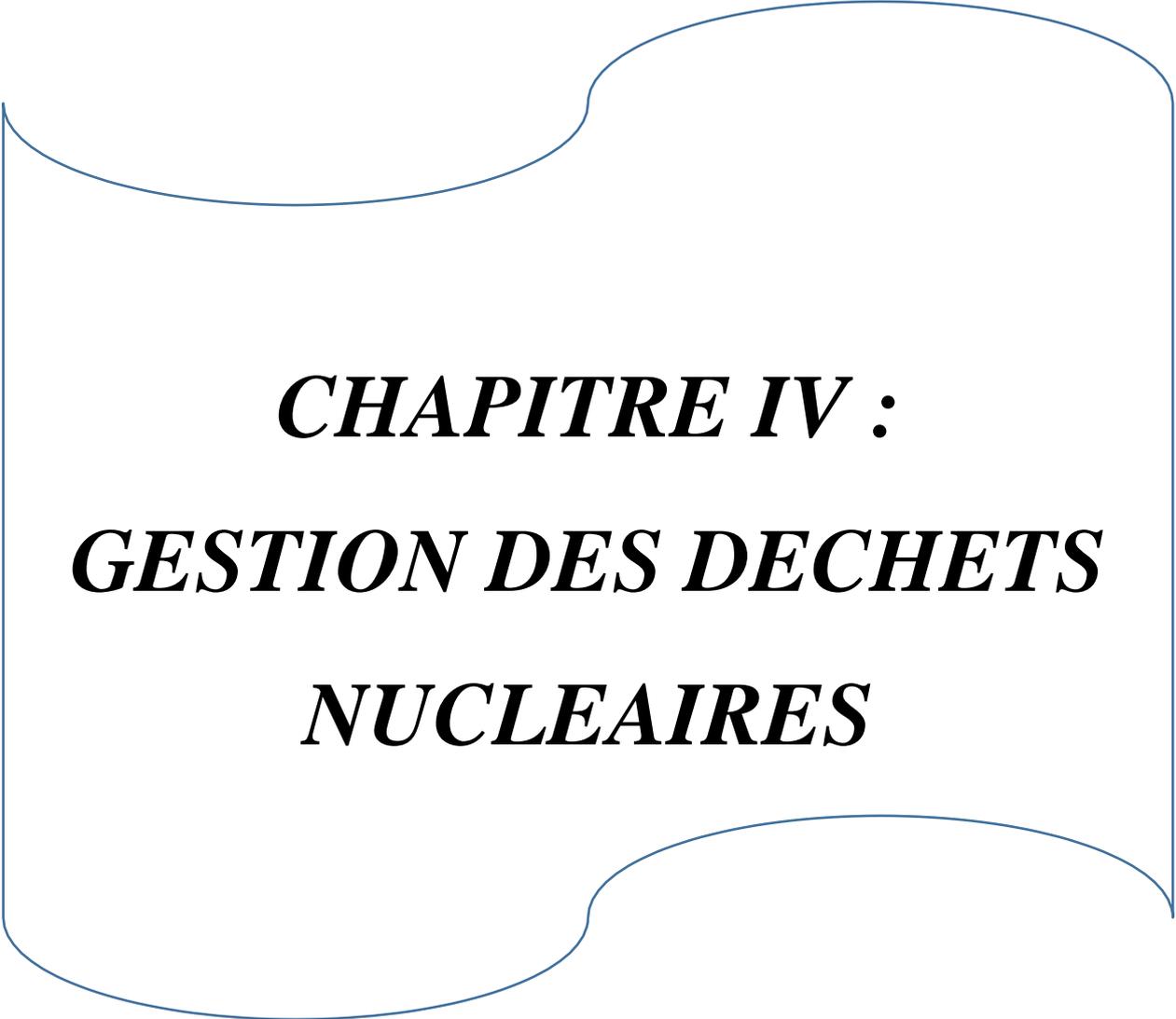
---

- Capables de répondre aux besoins énergétiques du futur.
- Présenter une probabilité et un degré très faibles de dommage de cœur.
- Présenter un net avantage de coût « cycle de vie » sur les autres sources d'énergie.
- Présenter un niveau de risque financier comparable aux autres projets énergétiques.

On site quelque réacteurs de la 4ème génération de réacteurs nucléaires

- Réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium (SFR).
- Réacteur à très haute température (VHTR).
- Réacteur à sels fondus (MSR).
- Réacteur à eau supercritique (SCWR)
- Réacteurs nucléaire rapide à caloporteur gaz (GFR).

Réacteur nucléaire rapide à caloporteur plomb (LFR)



***CHAPITRE IV :***  
***GESTION DES DECHETS***  
***NUCLEAIRES***

### 1/ Définition des déchets nucléaires

La principale caractéristique des résidus non réutilisables des activités des centrales nucléaires quelles qu'elles soient : production d'électricité, recherche, médecine ou industries, la présence de produits radioactifs, qu'ils sont classés selon deux critères :

- L'intensité de la radioactivité détermine l'importance des mesures de protection pour bien les gérer.
- La demi-vie des éléments radioactifs, qui représente une réduction naturelle de la moitié du noyau de l'élément considéré [30].

### 2/ Classification des déchets radioactifs

Chaque type de déchets radioactifs peut être classé selon des normes qui représentent le degré de risque, tel que le niveau d'activité et la demi-vie. Ces catégories sont importantes car elles aident à déterminer les méthodes de gestion de déchets. Bien que la classification des déchets puisse varier d'un pays à l'autre, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a établi six types de déchets [31]. Dans l'ordre de danger croissant, il y a : l'exemption des déchets, déchets à vie très courte, déchets de très faible activité, déchets de faible activité, déchets de moyenne activité et déchets de haute activité (AIEA, 2009). Chaque classe sera brièvement décrite ci-dessous.

- **Les déchets à vie courte** ne contiennent que des radionucléides à vie courte, cependant, la concentration de ses activités dépasse le niveau d'exemption. Ils viennent de principalement des départements médicaux et de recherche. En raison de leur courte durée de vie, ils peuvent être stockés en attendant la décroissance radioactive puis traités selon ses propriétés physiques, chimiques et la biologie.
- **Les déchets à vie longue** qui contiennent une quantité importante de radionucléides dont la période est supérieure à 31 ans.
- **Les déchets de très faible activité** contiennent une quantité très faible de radionucléides. Une grande partie de ces déchets provient du démantèlement des dispositifs entrant dans le cycle du combustible (Autorité de sûreté nucléaire, 2010). Les déchets miniers entrent également dans cette catégorie.
- **Les déchets faiblement radioactifs** dépassent le seuil d'exemption. Ces déchets doivent être confinés robuste et durable pendant des centaines d'années. Leur origine

est similaire aux déchets de très faible activité. Leur élimination est effectuée dans des installations spécialisées proches de la surface. En termes de manutention et de transport, ils ne nécessitent généralement pas de barrière de protection contre les rayonnements.

- **Les déchets de moyenne activité** contiennent des radionucléides pour le niveau de confinement fourni par l'installation à proximité de la surface et entre en contact avec la biosphère ne suffit plus. C'est pourquoi il est généralement recommandé de les envoyer vers une infrastructure profonde des dizaines de mètres voire des centaines de mètres sous terre. Cette décharge de déchets pénètre les radiations, il a donc besoin d'une protection pendant la manipulation transports. Ils viennent de principalement des activités de retraitement et de maintenance du combustible usé, et exploitation de l'usine de retraitement.
- **Les déchets de haute activité** contiennent des concentrations tellement élevées de radionucléides, qu'ils nécessitent le plus haut niveau de confinement. Il a été suggéré d'utiliser des formations géologiques profondes pour assurer un tel niveau d'isolation. La chaleur qu'ils dégagent en raison de leur forte radioactivité doit également être prise en compte lors de la manipulation, du transport et du confinement. Ces déchets comprennent principalement les déchets de combustible usé ou leur retraitement.

### **3/ Gestion des déchets nucléaires**

Le problème de la gestion des déchets radioactifs est un grand défi à relever, il doit être résolu par les décisions gouvernementales et les perceptions de la population quant au développement du nucléaire. D'autres enjeux sont aussi importants. Ils comprennent la santé humaine, la sécurité du public, l'environnement et l'énergie.

#### **3.1 La santé humaine**

Quelle que soit la source d'exposition, le danger pour la santé humaine est le même : les rayonnements ionisants modifient le matériel génétique. Lorsque les rayons ionisants frappent la cellule, elle peut l'absorber sans danger et mourir d'une blessure ou survivre à la blessure.

## ***CHAPITRE IV : GESTION DES DECHETS NUCLEAIRES***

---

Dans les deux cas de dommage cellulaires, Les molécules d'acide désoxyribonucléique (ADN) sont endommagées. Pour y faire face, nos cellules sont équipées d'un mécanisme de réparation de l'ADN, il peut donc se réparer lui-même. Cependant, ce processus n'est pas infallible. Un ADN endommagé peut causer les cellules meurent ou survivre. Si la Cellule est toujours vivante après avoir été endommagée, Les cellules cancéreuses sont créées parce que ce défaut sera transmis aux cellules filles produites au cours du processus Mitose cellulaire.

Plus précisément, les risques encourus par les personnes vivant à proximité des centrales nucléaires est l'exposition à des matières radioactives pouvant être rejetées dans l'atmosphère, entraînant erreur de fonctionnement ou défaillance de l'équipement. Ces versions nécessiteront la forme d'un nuage de radio-isotope principalement composé de gaz rares (Krypton et xénon) et un isotope radioactif de l'iode (iode 131 et 134). Le radio-isotope de l'iode est particulièrement intéressant car une fois qu'il pénètre dans le corps humain, soit par voie d'inhalation ou d'ingestion, ils peuvent se fixer à la thyroïde et augmenter le risque de cancer, en particulier chez les enfants [32].

### **3.2. Sécurité nucléaire**

Chaque structure et machine construite par l'homme comporte des risques pour ses utilisateurs et le public. Il en est de même pour les réacteurs nucléaires. Cependant, les risques associés aux réacteurs nucléaires sont souvent exagérés, principalement en raison des préoccupations concernant les effets potentiels de l'exposition aux rayonnements, et surtout, parce que les gens se souviennent des effets catastrophiques des armes nucléaires de la deuxième guerre mondiale.

Contrairement à la croyance populaire, la faible concentration de combustible de fission ne permet pas à un réacteur nucléaire commercial d'exploser comme le ferait une bombe nucléaire. Cependant la présence de matières radioactives et le combustible à haute énergie dans les réacteurs nucléaires présente néanmoins un risque d'accident et les réacteurs peuvent être la cible de comportements malveillants. Ces deux aspects sont discutés dans cette section.

### **3.2.1 Sureté des réacteurs**

Par rapport aux centrales électriques à combustible fossile, le réacteur d'énergie nucléaire présente des dangers particuliers de surchauffe, de fusion et éventuellement de libération de particules radioactives nocives. La propagation de la radioactivité peut être accélérée de différentes manières : Explosion causée par une accumulation de pression dans la conduite de vapeur ou la formation d'hydrogène. Pour éviter que cela ne se produise, un coffre-fort basé sur trois principes :

- Maitrise de la réactivité : cela consiste à maîtriser en permanence la réaction en chaîne se produisant dans le réacteur.
- Refroidir le cœur nucléaire : cela consiste à maintenir une circulation forcée de l'eau de refroidissement de circuit primaire (grâce aux pompes primaires), à évacuer la puissance thermique du cœur nucléaire (notamment par les générateurs de vapeur lorsque le réacteur est en fonctionnement) et à garder un stock d'eau suffisant en secours pour pouvoir maintenir le cœur sous eau en cas d'accident.
- Confiner les particules radioactives : cela consiste à maintenir les particules radioactives, notamment grâce aux trois barrières de confinement.

### **3.3. Environnement**

De nos jours, plusieurs problèmes et inquiétudes tels que l'engouffrement des centres urbains sous le smog, le réchauffement climatique et la diminution des espaces verts ont propulsé le thème de l'environnement au sommet de la liste des enjeux les plus médiatisés et les plus populaires. Le nucléaire, comme toutes autres sources d'énergie utilisées pour la production d'électricité, a un impact sur notre environnement. Il est important de noter que ces effets ne sont pas limités à l'opération des centrales, ils s'étalent du berceau au tombeau du cycle du combustible.

Les centrales nucléaires possèdent des rejets [33] de diverses natures :

- **Les rejets radioactifs** : Elles sont produites par les circuits d'épuration et de filtrage qui équipent les centrales nucléaires. Ces déchets sont classés selon leur niveau de radioactivité puis rejetés sous forme liquide ou gazeuse. Un seuil réglementaire a été imposé aux producteurs d'électricité, qui ne doit en aucun cas être dépassé, afin de ne pas augmenter la radioactivité naturelle de l'environnement.

## ***CHAPITRE IV : GESTION DES DECHETS NUCLEAIRES***

---

Concernant les produits de fission dans le réacteur à eau sous pression, ils restent dans le circuit d'eau de base. Par conséquent, la fonction du circuit secondaire est envoyée de la vapeur à la turbine n'est pas radioactive. Dans REP, ce n'est pas le cas avec de la vapeur est en contact direct avec le réacteur, par conséquent, tous les équipements en contact avec le réacteur les vapeurs nécessitent une radioprotection. Quel que soit le type de réacteur utilisé. Certains gaz rares radioactifs sont difficiles à contrôler, en raison de leur inertie chimique, ils essayent de faire passer le système d'épuration ou de protection dans le circuit primaire ces éléments comprennent principalement l'argon, le xénon, en particulier le krypton, qui sont rejetés dans l'atmosphère par de hautes cheminées pour l'alimentation diluée dès que possible.

- **Les rejets thermiques** : Les centrales nucléaires génèrent de la chaleur, ce qui provoque un réchauffement du milieu aquatique environnant, De même, le seuil de température ne doit pas être dépassé, afin de ne pas affecter la faune, la biodiversité et les écosystèmes aquatiques associés.

Le problème de la pollution thermique ne se limite pas à l'industrie nucléaire. Même si la gravité du problème peut varier selon la méthode de production d'électricité, néanmoins, il est encore courant pour toutes les personnes qui extraient d'abord de l'énergie sous forme de chaleur pour produire de la vapeur et fait tourner une turbine. Une Centrale électrique et les appareils électriques qui brûlent des combustibles fossiles en sont un bon exemple. Pas besoin d'entrer les détails de la thermodynamique, la pollution thermique vient du fait que la chaleur extraite ne peut pas être complètement convertie en énergie électrique.

Pour les centrales nucléaires fonctionnant à l'eau sous pression, le facteur de conversion est seulement un tiers. Les deux autres tiers sont perdus dans l'environnement. Ce chaud résidu est évacué au condenseur, où la vapeur sortant de la turbine est condensée en eau.

- **Les rejets chimiques** : elles sont présentes dans l'eau utilisée pour refroidir les usines. Celui-ci est filtré avant d'être relâché dans la nature. La réglementation est stricte et les émissions sont contrôlées régulièrement pour limiter l'impact sur la biodiversité.

À notre époque où le réchauffement climatique devient sévère, une caractéristique des réacteurs nucléaires mise en avant par les militants du nucléaire est l'absence d'émission de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Cependant, on pense que l'industrie nucléaire n'a aucune contribution au

réchauffement climatique car le CO<sub>2</sub> est libéré lorsque l'on analyse le cycle de vie complet du combustible. En d'autres termes, l'industrie nucléaire a libéré moins de CO<sub>2</sub> par rapport à d'autres industries conventionnelles, par exemple charbon et gaz naturel, les émissions totales de dioxyde de carbone sont même plus faibles que celles des domaines de l'hydroélectricité, de l'énergie solaire et éolienne. Du point de vue des émissions atmosphérique, la libération d'une petite quantité de CO<sub>2</sub> ce n'est pas l'avantage unique de l'énergie nucléaire : contrairement aux centrales à combustibles fossiles, la fission nucléaire ne libère pas de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>). Lorsqu'il est libéré dans l'air, il aide à former des pluies acides. De plus, le réacteur nucléaire n'émet pas les éléments toxiques suivants qui sont aussi caractéristiques de la combustion des combustibles fossiles : les composés organiques volatils (COV), le monoxyde de carbone (CO) ainsi que les dioxines et furane.

### **3.4 Energie**

Du fait de la réduction des réserves d'énergie fossile et des enjeux liés aux transports, le nucléaire civil apparait comme une alternative aux enjeux d'approvisionnement énergétique. Aujourd'hui, les hydrocarbures couvrent 80 % de la demande, et désormais ce nombre a fortement baissé, l'épuisement des énergies fossiles, et la forte croissance de la demande énergétique dans les pays émergents au niveau de vie hausse. L'allocation monopolistique des entreprises nucléaires est due à la nécessaire intensité capitalistique des centrales, avec un retour sur investissement moyen de plus de 20 ans, mais cette rentabilité peut fortement varier en raison de l'évolution des prix des énergies fossiles. Face aux enjeux environnementaux, le nucléaire offre une solution favorable à ses faibles émissions de gaz à effet de serre, mais en même temps, la forte utilisation de cette énergie amplifie le problème inhérent de non recyclage des déchets.

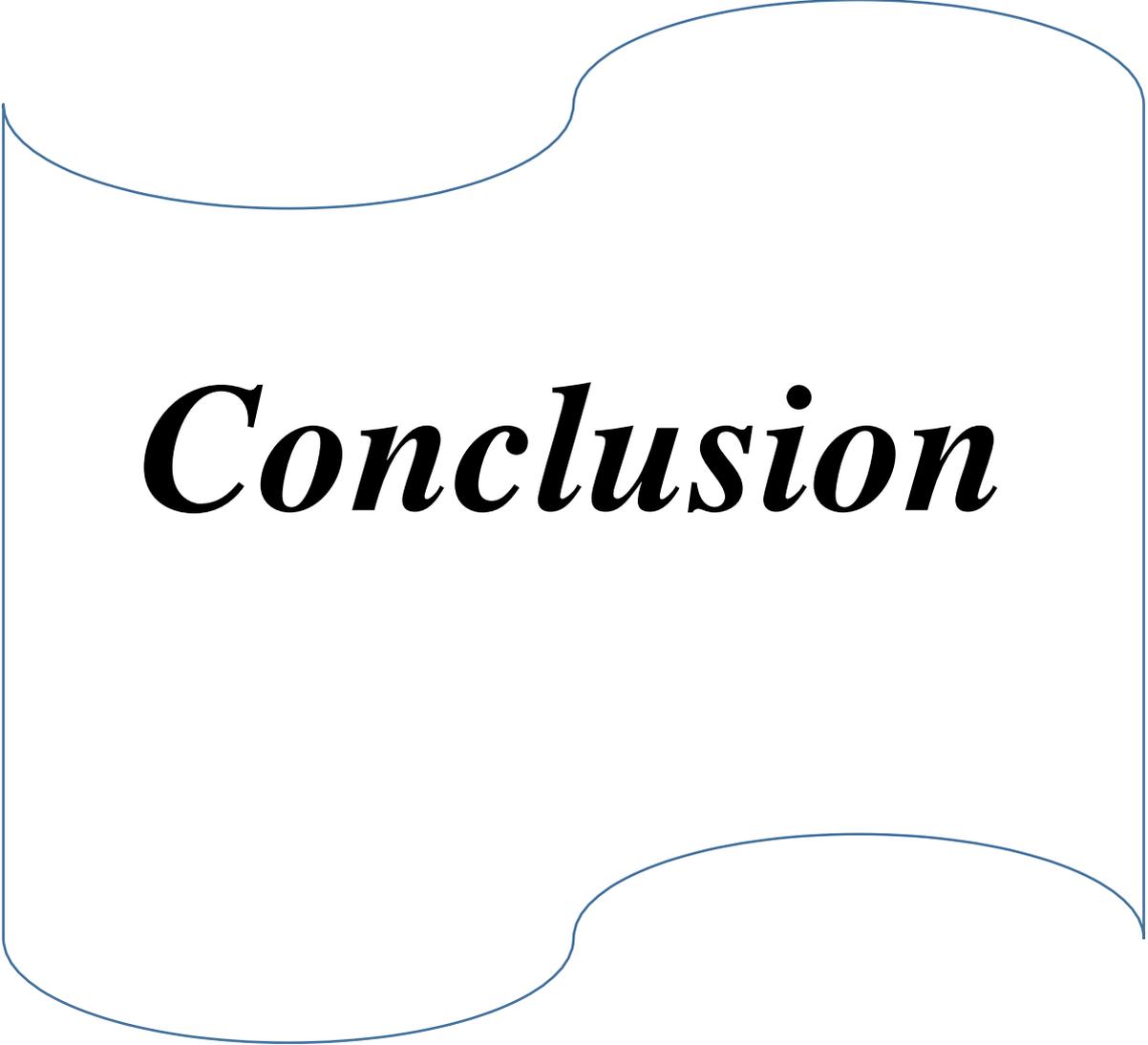
La nouvelle donne énergétique internationale a incité de nombreux décideurs politiques à se tourner davantage vers l'énergie nucléaire, même si l'énergie nucléaire ne représente actuellement que 15 % de la production mondiale d'électricité. Afin de cartographier le futur panorama énergétique, les Etats continueront d'étudier le potentiel énergétique pour l'aligner sur la demande afin d'optimiser la production et la consommation nationales. Quant aux pays producteurs d'énergie, ils peuvent exagérer leurs réserves dans des circonstances appropriées, ce qui n'est pas toujours directement vérifiable [34].

## ***CHAPITRE IV : GESTION DES DECHETS NUCLEAIRES***

---

L'énergie nucléaire est considérée comme la meilleur pour faire face aux défis environnementaux, aux problèmes de sécurité et à l'approvisionnement énergétique. Certes, les énergies renouvelables vont progresser, mais le coût est élevé : d'une part, elles seront impactées par intermittence, d'autre part, elles ont besoin de s'appuyer sur des infrastructures et des réseaux capables d'assurer la continuité de service. Par ailleurs, l'attention croissante portée à la protection de l'environnement (destruction des paysages, bruit, nuisance, pollution) est préoccupante. Les énergies renouvelables hors hydroélectricité et biomasse augmenteront d'environ 7 % par an.

Parallèlement, dans d'autres pays, le nucléaire est devenu une véritable arme énergétique pour certains pays (Iran, Corée du Nord, Amérique latine), et il est également devenu un enjeu de sécurité énergétique internationale. Ainsi, un examen approfondi des politiques énergétiques des différents pays au niveau mondial a révélé la place déterminante de l'énergie nucléaire dans diverses solutions énergétiques. La lutte contre le réchauffement climatique a renouvelé l'intérêt pour le nucléaire, qui émet moins de dioxyde de carbone que les énergies fossiles. Dans ce domaine et face aux nombreux problèmes qui en découlent, il est clair que les pays visent à maintenir leur indépendance énergétique en choisissant différentes solutions (fournisseurs et/ou diversification énergétique, appel à l'unité européenne, etc.) mais il n'y a qu'un seul objectif : réduire la vulnérabilité nationale [35].



# ***Conclusion***

### **Conclusion**

Sans toutefois revenir sur ce qui a été précédemment dit (chapitre I, II, III, IV) s'agissant de l'importance de l'énergie nucléaire face à la perspective de pénurie des combustibles fossiles, de leur impact néfaste sur la couche d'ozone, de leur compatibilité avec le développement durable, nous allons néanmoins souligner la place de l'énergie nucléaire dans la politique énergétique de l'Union européenne (UE). Représentant environ un tiers de la production européenne d'électricité et émettant peu de CO<sub>2</sub>, l'énergie nucléaire est considérée par la commission comme la « principale source d'énergie de l'UE largement exempte de carbone ». Tout en insistant sur la grande question des déchets et de la sécurité nucléaire, la commission a suggéré que l'Europe fixe l'objectif d'une proportion minimum de sources d'énergies sûres et à faible teneur en carbone dans le bouquet énergétique global de l'UE.

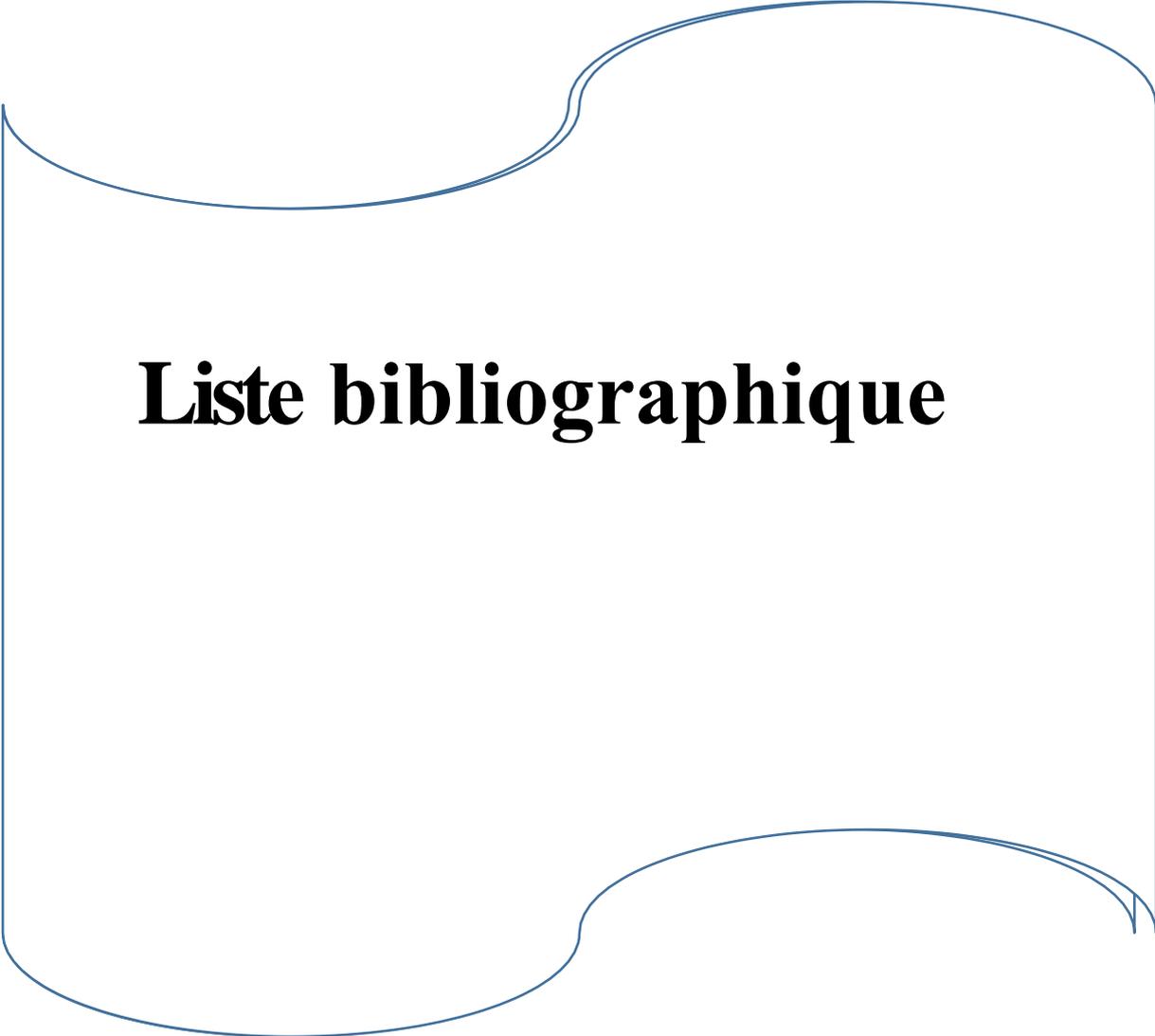
On conclut que l'impact de l'énergie nucléaire (en termes d'effets non radiologiques) est aussi positif que celui de l'hydroélectricité et des énergies renouvelables, par rapport aux autres options (pétrole, gaz et énergies renouvelables), ainsi le centre commun de recherche a cité des données de 2016 dans le rapport CCR montrant que l'électronucléaire donne de très bons résultats en termes de conséquences sanitaires par rapport aux autres sources d'énergie, ces conséquences étant évaluées en utilisant l'année de vie ajustée en fonction de l'incapacité, qui mesure la charge d'une maladie exprimée en tant que nombre d'années perdues du fait d'une mauvaise santé, d'une invalidité ou d'un décès prématuré.

Le stockage définitif des déchets nucléaires dans des formations géologiques profondes est la solution la plus efficace parmi les options qui sont actuellement disponibles. L'enfouissement géologique est la meilleure option pour éviter des éventuels dommages aux personnes et à l'environnement. Les accidents nucléaires ne peuvent être exclus avec une certitude de 100%. Mais le risque d'accident est très faible. Par rapport aux autres sources d'énergie.

Aujourd'hui, le domaine de micro a un grand intérêt. Cependant les chercheurs envisagent une variété de micro réacteur avec l'intention de remplacer les anciens réacteurs dans le but d'avoir des meilleures conditions de fonctionnement.

Les petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactors, SMR) ne se classent donc pas dans une logique des réacteurs de deuxième, troisième et quatrième génération. Ils se classent dans une logique de recherche de taille optimale liée à la demande du marché et aux besoins des décideurs économiques. De plus, ils constituent une nouvelle gamme de réacteurs nucléaires, caractérisés par leur faible puissance (moins de 300 MWe) et leur construction modulaire standardisée en usine. Les coûts d'investissement modérés et progressifs rendent l'accès au nucléaire possible pour des compagnies d'électricité de taille moyenne ou des pays contraints économiquement. Ainsi, plusieurs pistes sont donc explorées, pour proposer des réacteurs modulaires de petite puissance, en tentant de ne pas trop pénaliser le coût final du MWh proposé :

- Profiter de la petite taille pour simplifier certains problèmes de sécurité, tel que l'élimination de la chaleur perdue, et faciliter la conception et l'exploitation.
- Profiter d'un effet de série en fabriquant ces réacteurs de manière modulaire, avec un maximum de constructions en usine.
- Grâce à une conception modulaire, il est possible de diversifier l'investissement dans le temps (au fil du temps) au même endroit.



# **Liste bibliographique**

## *Liste bibliographique*

- [1] Livret- thématique/livret réacteurs.pdf, cea.fr/multimédia
- [2] H. Taibi cours de physique nucléaire 2019-2020
- [3] D. Bertolloto, P.Frajtag, G.Gardin Flux neutronique- théorie et Mesures 2011
- [4] P. Baeten physique des réacteurs nucléaires
- [5] L.Valentin physique subatomique noyaux et particules, Tome 1 Approche élémentaire 1975
- [6] Principe et physique des réacteurs nucléaires (eric.royer@cea.fr) 2012
- [7] J.Barrett L'aide-mémoire du nucléaire 2019
- [8] J. Pierre Hutin La maintenance des centrales nucléaires
- [9] L. Echavarri L'énergie nucléaire aujourd'hui
- [10] M. Ammerich, Le cycle combustible 11 Juin 2018
- [11] <https://energie-nucleaire.net/fonctionnement-centrale-nucleaire/le-reacteur-nucleaire/les-barres-de-contrôle>
- [12] Mémoire de fin d'étude, Modélisation de la dispersion atmosphérique des radionucléides 2010
- [13] A.Biuclebaud Les nouveaux concepts de réacteurs nucléaires 2018
- [14] S.Cadet-Mercier, P.Franck Chevet L.Evrard, M.Tirmarchie, P.Chauniet-Riffaud L'état de la sûreté nucléaire et de la radio protection 2017
- [15] P. Hatmann Prélèvements d'eau et rejets 2013
- [16] J.Kupitz, M.Podest les applications de la chaleur nucléaire dans le monde AIEA BULLETIN, VOL.26 no 4
- [17] Gleen T.Seaborg Le premier réacteur nucléaire, la production de plutonium et son extraction par des procédés chimique AIEA BULLETIN, VOL.26 no 4
- [18] Y.Cohen Les isotopes radioactifs rapport CEA n° 2150
- [19] L. Bennet, Situation et évolution de l'énergétique nucléaire dans le monde AIEA BULLETIN, AUTOMNE 1986
- [20] PJ.Meyer et W.Grüner La nouvelle génération de réacteurs à eau légère AIEA BULLETIN, 3/1989

- [21] Principe et physique des réacteurs nucléaires (eric.royer@cea.fr) 2012
- [22] J. Lipset, T. Dunn, Technologie et conception avancées des réacteurs à eau lourde AIEA BULLETIN, 3/1989
- [23] P. Bernard, Recherche et développement pour l'énergie nucléaire du futur  
2002
- [24] J. Repussard appréciation en matière de sûreté et de radioprotection 2012
- [25] J.François Parisot les réacteurs nucléaires à caloporteur gaz 2006
- [26] Livret thématique n6 les réacteurs nucléaire
- [27] VAN Goethem Dr. Ir Fission nucléaire, aujourd'hui et demain : de la renaissance au saut technologique (Génération IV)
- [28] J-Luc Jacoud, Ftenon- Morin, P.Videline, les réacteurs nucléaires de troisième génération vers une sûreté renforcée
- [29] P.Birnard, Le programme de coopération internationale Génération IV 2009
- [30] J. Cooper, Quel déchets sont radioactifs ? AIEA BULLETEIN ,42/3/200
- [31] La gestion des déchets en INB (www.istn.cea.fr ) octobre 2012
- [32] M. Tubiana, Risques inhérents aux différentes sources d'énergie
- [33] projet fin d'études Analyse comparative de la gestion des matières résiduelles radioactives dans les pays industrialisés université de Sherbrooke 2013
- [34] J.Rivest Réflexion critique sur le rôle des énergies fossiles dans la prochaine politique énergétique du Québec 2014
- [35] www.cairn.info

## Résumé

L'énergie électrique joue un rôle essentiel dans notre vie quotidienne. Elle est l'un des éléments clé au développement durable de la société humaine.

L'énergie nucléaire dans certains pays est l'un des modes de production de l'énergie électrique au sein des centrales nucléaires, en effet, la chaleur dégagée par la fission des atomes d'uranium dans le cœur des réacteurs nucléaires transforme l'eau en vapeur. Celle-ci est utilisée pour mettre en mouvement des turbines, elles même reliées à des alternateurs qui produisent ainsi de l'électricité.

Une fois l'uranium utilisé, il reste une matière, qui ne peut plus servir à alimenter les réacteurs, qui est envoyé dans une usine de traitement, où il est trié selon son degré de radioactivité. Ensuite, ces déchets nucléaires sont stockés ou enterrés profondément

De nouvelles opportunités pourraient stimuler le développement de l'énergie nucléaire civile dans les décennies à venir tels que les recherches technologiques en vue de maîtriser les réacteurs qui pourrait résoudre les problèmes de sécurité d'approvisionnement et de déchets et l'émergence des « smart grids » (réseaux de distribution électrique intelligents), conjuguée à celle de petits réacteurs modulaires (150 MW), consommateurs d'uranium appauvri. Les progrès attendus en fusion nucléaire, énergie puissante et disposant également de ressources naturelles considérables, pourraient ouvrir une seconde voie de production d'énergie nucléaire.