

# République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et Technologie

Département des Sciences et Technologie

Projet de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## LICENCE

**Domaine :** Science et Technologie

**Filière :** Génie électrique

**Spécialité :** Maintenance en instrumentation industrielle

**THEME:**

***Instrumentation des centrales nucléaires***

**PAR**

**DOUDOU Mohamed**

**DOUDOU Abdenour**

**Jury:**

**M<sup>r</sup>:TOUAFEK Khaled**

Maitre de recherche A URAER. Ghardaïa

**Encadreur**

**M<sup>r</sup>: KIFOUCH Abdessalam**

Maitre Assistant A l' Univ. Ghardaïa

**Examineur**

**ANNEE UNIVERSITAIRE: 2014/2015**

N°d'ordre :

N° de série:

## REMERCIEMENTS

---

On tient tout d'abord à remercier Mr TOUAFEK Khaled, notre encadreur, pour tout le soutien, l'aide, l'orientation qu'il nous a apportés.

On tient aussi à remercier vivement tous nos enseignants pour leur précieux conseils et leur encouragements lors de la réalisation de notre mémoire.

On tient ensuite à remercier nos parents pour le soutien inconditionnel dont ils ont fait preuve depuis que notre projet professionnel est défini. Merci pour le soutien financier, moral, psychologique et matériel. Si on est ici aujourd'hui, c'est grâce à vous !

On souhaite aussi remercier, nos frères et sœurs pour leur accompagnement durant ces trois années et leur soutien sans faille.

On veut bien entendu remercier tous nos collègues Brahim, lokman, Mounir, Amin ,Yacin, Abdou

On remercie également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de ce mémoire.

Enfin, on remercie nos amis et camarades de promotion pour ces trois années passées ensemble, dans les meilleurs moments comme dans les pires.

# Sommaire

REMERCIEMENTS.....	2
Introduction .....	5
<b>Chapitre I</b> La physique nucléaire .....	6
A. Historique .....	7
B. Réactions chimiques .....	7
C. L'alchimie .....	8
D. Réactions nucléaires .....	9
E. Fusion et fission .....	10
F. Energie de liaison par nucléon.....	11
G. Radioactivité .....	13
H. Radioactivité $\alpha$ .....	13
H.1 Phénomène physique .....	14
H.2 Spectre énergétique .....	14
H.3 Vitesse d'émission de la particule $\alpha$ .....	15
I. Radioactivité bêta .....	15
J. Radioactivité gamma .....	17
K. Tableau périodique des éléments .....	17
K.1 Construction du tableau .....	19
K.2 Règle de Klechkowski .....	19
K.3 Exceptions et règle de Hund .....	19
K.4 Périodicité des propriétés chimique .....	20
L. Fusion contrôlée .....	21
M. Datation par le carbone 14 .....	22
<b>Chapitre II</b> Centrale nucléaire .....	23
1.Introduction .....	23
2.Histoire .....	23
3.construction .....	25
4.La déconstruction .....	26
4.1. La fermeture sous surveillance.....	26
4.2. La libération partielle et conditionnelle .....	26
5.Analyse économique d'une centrale nucléaire .....	27
6. Les centrales nucléaires dans le monde .....	29
6.1 Liste de réacteurs nucléaires .....	29
6.1.1 Réacteurs nucléaires militaires .....	30
6.1.2 Réacteurs nucléaires civils .....	30
7.Les différents types de réacteurs .....	32
8.les impacts environnementaux d'une centrale nucléaire .....	33
8.1Rejets radioactifs et déchets .....	34
8.2 L'eau n'est-elle pas le plus grand gaz à effet de serre .....	34

<b>chapitre III</b> : instrumentation en centrale nucleaire .....	35
instrumentation en centrale nucleaire .....	35
Introduction .....	35
3. les 3 circuits d'eau dans une centrale nucléaire .....	37
3.1 Le circuit primaire .....	38
3.1.1 La cuve et ses équipements internes .....	39
3.1.1 A. Les équipements internes .....	39
3.1.1 B les équipements internes inférieurs .....	39
3.1.1. C le couvercle de la cuve .....	40
3.1.1. D Barre de contrôle .....	40
3.1.2 Les générateurs de vapeur .....	41
3.1.3 Les tuyauteries primaires .....	42
3.1.4 Les groupes motopompes primaires .....	42
3.1.5 Le pressuriseur .....	43
3.2 Circuit secondaire .....	44
3.2.1 La turbine à vapeur .....	44
3.2.2 L'alternateur .....	44
3.3 Circuit de refroidissement .....	46
3.3.1 Le condenseur .....	46
3.3.1.A Principes de fonctionnement .....	46
3.3.2 Cellule métallique .....	47
4. L'instrumentation de commande .....	48
4.1 Capteurs .....	48
4.2 automates de commande programmables .....	48
5. Architecture du contrôle-commande .....	49
Conclusion.....	50
Bibliographie.....	51
Liste des figures .....	52
Liste des Tableaux.....	53

# Introduction

---

Au cours du XXe siècle, la demande en électricité n'a cessé d'augmenter, conduisant les scientifiques à chercher de nouvelles sources d'énergie ainsi que de nouveaux moyens de produire de l'électricité. La production d'électricité a d'abord été d'origine thermique et hydraulique. Mais les recherches menées sur la radioactivité dès la fin du XIXe siècle et pendant la première moitié du XXe siècle ont permis de mettre à jour le potentiel du nucléaire

L'énergie nucléaire est aujourd'hui l'une des sources de production d'électricité la plus utilisée au monde, environ 16% de l'électricité mondiale est produite dans 450 réacteurs.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les centrale nucléaire et leurs instrumentation .ce mémoire s'articulera autour de trois chapitres.

- le premier chapitre constituera en un rappel de physique nucléaire qui est la science qui s'intéresse à l'ensemble des phénomènes physiques faisant intervenir le noyau atomique.

- Le chapitre deux présentera l'actualité des centrales nucléaire et sa rôle dans le domaine énergétique , les réacteurs nucléaires construits dans le monde et leurs impact sur l'environnement et l'économie des pays .

- Enfin, dans le chapitre trois, nous exposerons l'ensemble de principaux instrumentations d'une centrale nucléaire et les installations permettant la production d'électricité

# Chapitre I : la physique nucléaire

## A) Historique

La recherche sur la radioactivité est à l'origine de la découverte de l'énergie nucléaire. La première étape de cette recherche est franchie en 1895 lorsque le professeur Prussien Wilhelm Roentgen conçoit l'existence de rayons capables d'impressionner des images sur des plaques noires (grâce à des radiations) et capables de faire voir le squelette humain à travers ces plaques : les rayons X. En 1896, Henri Becquerel poursuit ses recherches et démontre que l'uranium est la matière qui est à l'origine de ces rayons radioactifs. Entre 1898 et 1906, Pierre et Marie Curie font des recherches qui conduisent à la découverte d'autres substances ou matières radioactives : le polonium, le thorium et le radium, ce qui leur rapporte un prix Nobel de physique en 1903.

Par la suite, de 1914 à 1933, des études faites par différents scientifiques (dont Rutherford, Villard, Bohr, Soddy et Fermi) mènent à des progrès dans le domaine de l'infiniment petit. Chadwick découvre l'existence du neutron (particule composant l'atome), essentielle plus tard dans le domaine du nucléaire.

En 1934, Irène et Frederic Joliot-Curie observent l'existence de la radioactivité artificielle qui permet de générer des rayons radioactifs plus facilement, Rutherford avait en effet démontré l'existence de la radioactivité à l'état naturel (dans notre corps par exemple), et donc la création d'un élément radioactif, n'existant pas à l'état naturel, est ce que l'on appelle la radioactivité artificielle.

La fission ("La production d'énergie nucléaire") est découverte en 1938, par Hahn et Strassmann, deux physiciens allemands, qui montrent que le noyau de l'atome d'uranium peut être cassé sous l'impact d'un neutron.

Le premier réacteur nucléaire civil voit le jour en 1951, aux Etats-Unis. La première connections d'une centrale nucléaire au réseau électrique à lieu en juin 1954, à Obninsk (URSS). Elle avait une puissance de 5 Mégawatts.

En France, le premier réacteur à voir le jour fut celui de Marcoule (Provence) en janvier 1956; la même année la centrale de Sellafield (Royaume-Uni) entre en fonction; puis le réacteur nucléaire de Shippingport (États-Unis) en 1957.

Entre 1970 et 1990, la Génération II de réacteurs est déployée. Elle correspond à la majorité du parc en exploitation dans le monde, aujourd'hui. Cette génération est née de la nécessité apparue dans

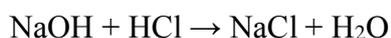
les années soixante-dix de rendre l'énergie nucléaire compétitive et de diminuer la dépendance énergétique de certains pays au moment où des tensions importantes sur le marché des énergies fossiles se faisaient jour. Cette époque fut celle du déploiement des réacteurs à eau sous pression (REP) et des réacteurs à eau bouillante (REB), qui constituent ensemble, aujourd'hui, plus de 85% du parc électronucléaire mondial.

La troisième génération représente l'état de l'art industriel constructible le plus avancé. Il s'agit de réacteurs dits « révolutionnaires » : ils bénéficient du retour d'expérience et de la maturité industrielle des réacteurs à eau de la deuxième génération, tout en intégrant les spécifications les plus avancées en matière de sûreté. Sachant que la deuxième génération témoigne déjà dans les faits d'un très haut niveau de sûreté. Imaginés dans les années 90, les réacteurs de troisième génération commencent à se déployer. C'est notamment le cas du réacteur EPR, European Pressurized water Reactor, qui sera construit en France sur le site de Flamanville. Le chantier doit débuter à la fin de l'année 2007 pour une mise en service en 2012.

## B) Réactions chimiques

La notion de réaction est bien mieux connue dans le domaine de la chimie que dans le domaine nucléaire. Aussi ferons-nous d'abord une claire différence entre les deux.

Une réaction chimique consiste à prendre deux molécules (associations d'atomes), à en extraire les constituants, et à les recoller différemment. Par exemple, NaOH (une molécule de soude caustique, constituée d'un atome de sodium Na, un atome d'oxygène O, et un atome d'hydrogène H) et HCl (une molécule d'acide chlorhydrique, constituée d'un atome d'hydrogène H et d'un atome de chlore Cl) vont donner NaCl (une molécule de sel de cuisine, ou chlorure de sodium, constituée d'un atome de sodium Na et d'un atome de chlore Cl) et H<sub>2</sub>O (une molécule d'eau, constituée d'un atome d'oxygène O et de deux atomes d'hydrogène H). On écrit plus simplement :



On remarque que le nombre d'atomes de chaque espèce est le même avant et après la réaction (à gauche et à droite de la flèche). Ils sont conservés. On dit que la réaction est équilibrée.

Puisque ce sont les électrons qui collent les atomes dans une molécule, le nombre d'électrons de chaque atome détermine sa capacité plus ou moins grande à participer à ces réactions, c'est-à-dire ses propriétés chimiques. Il assure aussi la neutralité électrique de l'atome, donc il est identique au

nombre de protons du noyau. En fin de compte, c'est donc le nombre de protons d'un noyau qui détermine, indirectement, ses propriétés chimiques.[11]

Pour définir un noyau, on donne le nombre de protons qu'il contient, on le note  $Z$ , et on le nomme numéro atomique. Deux éléments chimiques différents ont des numéros atomiques différents ; deux isotopes d'un même élément possèdent le même numéro atomique. Pour préciser l'isotope considéré, il faut donner le nombre de neutrons. Mais l'habitude est autre, on donne la masse atomique, c'est à dire le nombre de nucléons (protons + neutrons),  $A$ . Par exemple, pour le carbone 14, on a  $Z = 6$ ,  $A = 14$ . Le nombre de neutrons est  $N - Z = 8$ .

Le carbone 14 est le plus célèbre des isotopes du carbone, et sert à dater les résidus organiques anciens. En fait, un morceau de carbone est constitué d'un mélange d'atomes, dont la plupart possèdent 6 protons et 6 neutrons, mais quelques uns ont 7 ou 8 neutrons. On les nomme carbone 12,  $^{12}\text{C}$ , carbone 13,  $^{13}\text{C}$ , et carbone 14  $^{14}\text{C}$ . [9]

Un autre exemple célèbre est l'eau lourde, dont les molécules sont constituées avec des atomes d'hydrogène lourd ou deutérium : un proton et un neutron. La masse d'un tel atome est à peu près double de celle de l'hydrogène normal. Il existe aussi un hydrogène super lourd, avec deux neutrons, nommé tritium. [18]

Avez-vous déjà bu de l'eau lourde ? Sans aucun doute ! En effet, l'eau des océans en contient un faible pourcentage. Il y en a donc un peu dans nos bouteilles d'eau minérale.

### C) L'alchimie

Retenez bien que les réactions chimiques portent sur les nuages électroniques, sans jamais toucher aux noyaux. La chimie est produite par l'interaction électromagnétique. C'est pour cette raison qu'un atome de plomb restera toujours, quelque réaction chimique que vous puissiez lui faire subir, un vulgaire atome de plomb... Le rêve de l'alchimiste ne risquait pas se réaliser de cette façon !

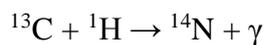
Mais la physique nucléaire donne la solution, et nous allons voir qu'on est capable de transformer un noyau de plomb en noyau d'or, à condition de payer le prix en énergie, ce qui ruinera (c'est le cas de le dire) tout espoir dans ce domaine. On sait le faire, mais ça coûte cher ! C'est peut-être bien mieux ainsi... La Pierre Philosophale est un accélérateur de particules.[11]

**D) Réactions nucléaires**

Les réactions que nous allons étudier maintenant portent sur les noyaux (latin nucleus), c'est pourquoi on les nomme réactions nucléaires. C'est l'interaction forte qui en est responsable.

De la même manière qu'une réaction chimique, une réaction nucléaire consiste à prendre certains composants, et à les remplacer par d'autres. Elle s'écrit donc de manière semblable, avec un groupe d'éléments à gauche, une flèche au centre, et un autre groupe à droite.

Les constituants sont des noyaux atomiques (constitués de protons et neutrons), et la réaction les réarrange en deux nouveaux noyaux, en conservant le nombre de nucléons. Par exemple, un atome de  $^{13}\text{C}$  (carbone 13, 6 protons et 7 neutrons) et un atome d'hydrogène (1 proton) vont donner un atome de  $^{14}\text{N}$  (azote 14, 7 protons et 7 neutrons). Ce qui s'écrit :



Dans cette réaction, le  $\gamma$  (gamma) représente un photon qui est émis, et qui emporte de l'énergie. Nous verrons un peu plus loin pourquoi.

L'énergie qui gouverne une réaction nucléaire est des centaines de millions de fois plus élevée que celle qui gère les réactions chimiques. Aussi, dans les conditions qui permettent les réactions nucléaires, les électrons des atomes ont été arrachés depuis longtemps, ce qui justifie qu'on les ignore. La chimie et les réactions nucléaires se produisent dans des domaines d'énergie très différents !

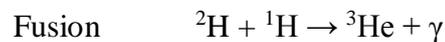
Remarques :

Dans la réaction nucléaire, l'équilibre chimique est rompu : il y a un atome de carbone à gauche, et il n'y en a pas à droite. Par contre, le bilan de neutrons et protons est respecté :  $(6p + 7n) + 1p = 7p + 7n$ . Il s'agit d'une réaction nucléaire à proprement parler.

Il existe d'autres réactions, dans lesquelles le nombre de nucléons est conservé, mais pas leur genre. Un proton peut se changer en neutron, et réciproquement. La responsable de ces changements est l'interaction faible, et des électrons sont concernés par ces transformations. Une réaction bêta change un proton en neutron, ou l'inverse, ce qui fait que le noyau qui la subit n'est plus de la même espèce chimique. C'est ce qui permet certaines transmutations.[12]

### E) Fusion et fission

Les réactions nucléaires sont de plusieurs types, selon les transformations produites. On distingue tout d'abord les réactions de fusion, et les réactions de fission. Dans les premières, on ajoute des composants pour former des noyaux plus lourds, dans les secondes au contraire, on casse un gros noyau pour en produire de plus petits. Voici deux exemples de telles réactions :



L'hydrogène fusionne pour donner de l'hélium (4 noyaux d'hydrogène donnent un noyau d'hélium), mais l'hélium lui-même peut fusionner pour donner des éléments plus lourds encore, carbone (3 noyaux d'hélium donnent un noyau de carbone), oxygène, azote. Dans ce genre de réactions, il faut comme précédemment faire le bilan énergétique[9]. Toutes les réactions de fusion produisent de l'énergie. Mais on s'aperçoit que l'énergie qu'elles dégagent est de plus en plus faible à mesure qu'on considère la fusion d'éléments plus lourds (en partant du plus léger, l'hydrogène). Lorsqu'on arrive à synthétiser du fer, la différence s'annule. Le bilan énergétique devient défavorable, à partir du fer, la réaction consomme de l'énergie au lieu d'en produire. On peut dire cela autrement : pour  $A < 56$ , la réaction est exothermique, au-dessus, elle devient endothermique.

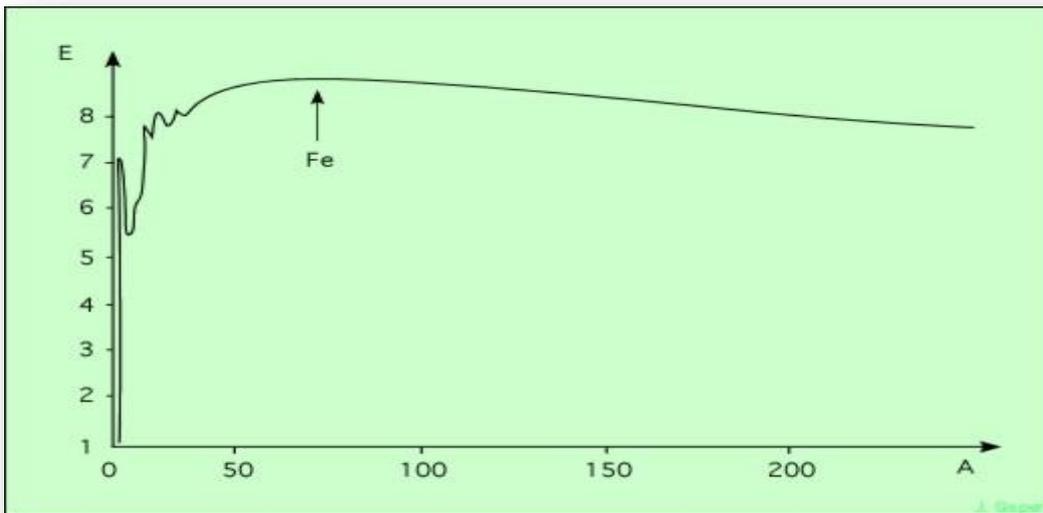


Figure 1 Energie de liaison par nucléon [14]

### F) Energie de liaison par nucléon

Ce schéma (Figure 1) montre l'énergie de liaison par nucléon, entre les nucléons qui constituent un noyau atomique. Pour que ceci ait un sens, on a divisé l'énergie totale de liaison à l'intérieur de l'atome par le nombre de nucléons. On montre ainsi une énergie moyenne par nucléon.

La compréhension de cette énergie est facile, grâce à une analogie. Vous achetez un sac de deux kilos de pommes de terre au supermarché du coin, vous le payez 2,30 euros. Le dimanche, au cours d'une excursion, vous achetez un sac de 50 kg de pommes de terre directement à la ferme, vous le payez 20 euros. Qu'est ce qui est le plus avantageux ? Impossible de comparer directement les deux prix, puisqu'ils ne portent pas sur la même quantité. Pour répondre, vous diviserez les deux prix par la quantité correspondante pour obtenir le prix au kilo. L'énergie par nucléon est obtenue exactement de la même manière. Les pommes de terre étant toutes différentes, on utilise le kilo. Mais les nucléons ont tous la même masse, ce qui permet d'utiliser leur nombre.[6] [3]

Pour le fer 56, par exemple, c'est la différence entre la masse des nucléons qui le composent et la masse du noyau  $^{56}\text{Fe}$ , divisé par le nombre de nucléons (ici 56) :

$$(26 m_p + 30 m_n - m_{\text{Fe}}) / 56$$

où  $m_p$  = masse du proton,  $m_n$  = masse du neutron,  $m_{Fe}$  = masse du noyau de fer 56. Il faut exprimer les masses en  $eV/c^2$ , équivalence justifiée par l'équation d'Einstein  $E = mc^2$  [7]

Ce qui est remarquable, c'est que la courbe montre un maximum au niveau du fer. Ceci signifie que les nucléons dans un noyau de fer sont plus fortement liés à leurs voisins que dans tout autre noyau ! Les noyaux de fer sont donc les plus stables : pour les casser, il faut plus d'énergie que pour tout autre

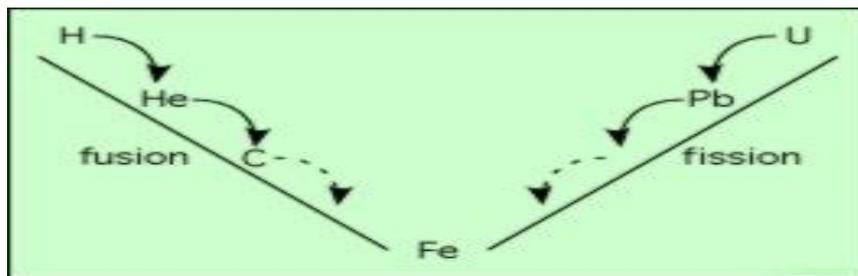


Figure 2 sorte d'entonnoir [14]

Ce schéma (Figure 2) représente une sorte d'entonnoir, ayant le fer au centre. Ce dernier est le point de stabilité maximum. La fusion des divers éléments, depuis l'hydrogène jusqu'au fer, suit la pente descendante de gauche. De même, la fission de l'uranium suit l'autre pente. Ceci symbolise le caractère exothermique de ces réactions. Par contre, si on voulait fusionner des éléments plus lourds que le fer, il faudrait remonter la pente (du côté droit), donc fournir de l'énergie. Il faudrait fournir de l'énergie aussi de l'autre côté pour briser des atomes plus légers que le fer. Dans une étoile, il ne serait pas possible de fournir de l'énergie pour fusionner au-delà du fer, car ceci diminuerait l'énergie disponible, donc la pression, et romprait l'équilibre de l'étoile.[5] [7]

Ceci ouvre une voie de recherche : quelle est la stabilité de chaque noyau ? Lorsqu'on teste une nouvelle colle, on se demande si elle va tenir... Cette question se pose pour des éléments chimiques différents, mais aussi pour les isotopes d'un même élément, puisque ce sont des noyaux ayant un nombre différent de neutrons. Certains noyaux ne risquent-ils pas de se casser ?

Une réaction nucléaire doit se faire (dans le sens de la flèche qui la représente) du moins stable vers le plus stable, comme un pendule évolue vers sa position d'équilibre. Des noyaux légers auront donc tendance à s'assembler (par réaction de fusion), alors que des noyaux lourds auront tendance à se briser (par réaction de fission). Dans les deux cas, ils se rapprochent du fer.

Bien que les réactions de fusion et de fission soient de nature très différente, elles procèdent des mêmes principes fondamentaux de la physique.

## G) Radioactivité

La radioactivité a été découverte par Becquerel en 1896 sur des sels d'uranium, puis confirmée peu après par Marie Curie sur le thorium. Les radionuclides (éléments radioactifs) les plus répandus sont l'uranium 238, le thorium 232 et le potassium 40. Un champ magnétique partage les rayonnements produits par des sels uraniques en trois faisceaux différents, nommés historiquement alpha, bêta et gamma. Ce sont les trois formes de radioactivité. Les trois consistent en l'émission d'une particule, avec les changements associés.

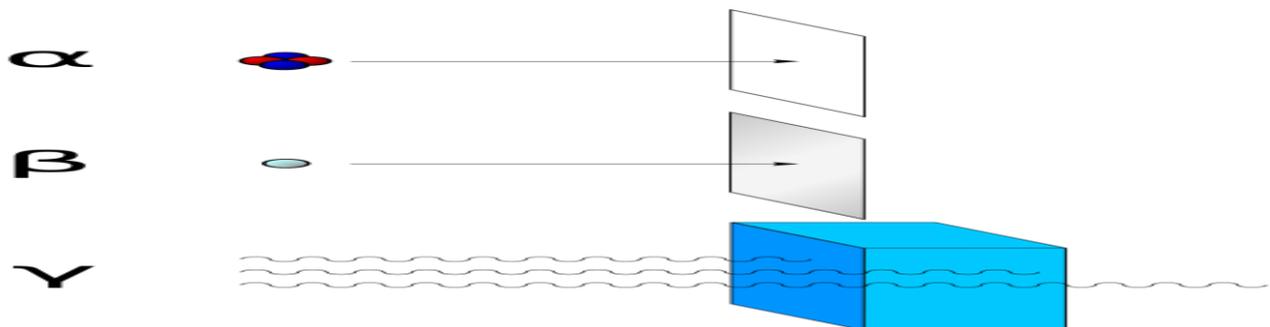


Figure 3 les différents genres de radiation ionisante [19]

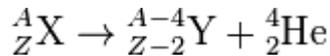
Ce diagramme (Figure 3) présente les différents genres de radiation ionisante et leur capacité à pénétrer la matière. Les particules alpha sont arrêtées par une simple feuille de papier tandis que les particules bêta sont stoppées par une feuille d'aluminium. Le rayonnement gamma quant à lui, très pénétrant est amorti quand il pénètre de la matière dense. Les rayons gamma peuvent être arrêtés avec quatre mètres de béton.

## H) - Radioactivité $\alpha$ [18]

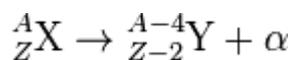
La radioactivité alpha (ou rayonnement alpha, symbolisé  $\alpha$ ) est le rayonnement provoqué par la désintégration alpha, soit la forme de désintégration radioactive où un noyau atomique  $X$  éjecte une particule alpha et se transforme en un noyau  $Y$  de nombre de masse diminué de 4 et de numéro atomique diminué de 2.[10]

## H.1 Phénomène physique

La désintégration alpha peut être vue comme une forme de fission nucléaire où le noyau père se scinde en deux noyaux fils dont l'un est un noyau d'hélium.



ou



où  $A$  représente le nombre de masse (nombre de nucléons),  $Z$  le numéro atomique (nombre de protons).

Il est vite apparu un lien remarquable entre l'énergie disponible de la réaction (pratiquement, l'énergie cinétique de la particule  $\alpha$ ) et la période radioactive du noyau père : les périodes sont d'autant plus grandes que l'énergie disponible est petite. Cette observation a mené à une interprétation de la désintégration comme due à un effet tunnel entre le puits de potentiel intranucléaire et l'extérieur de la barrière de potentiel coulombienne existant entre les deux noyaux finaux ; ceci constitue le fondement du modèle de Gamow.[1] [3]

Si on excepte le cas des fissions, le rayonnement alpha est en pratique la seule façon pour un atome de perdre des nucléons, soit donc 4 par 4 (2 neutrons + 2 protons)

## H.2 Spectre énergétique

Au niveau énergétique, la désintégration  $\alpha$  présente un spectre de raie, signature de la différence des masses des noyaux père et fils.

Un zircon dans une matrice de biotite : Des particules alpha émises par désintégration radioactive bombardent et détruisent la matrice ; il se forme ce qu'on appelle un halo pléochroïque. [5]

Pour certains isotopes, la raie est unique, mais pour d'autres un même noyau père peut (statistiquement) mener au noyau fils dans plusieurs états différents : soit son fondamental, soit l'un de ses états excités, il conserve alors une partie de l'énergie retranchée à celle que reçoit la particule

$\alpha$ . Une série de raies est alors présente dont l'intensité dépend de la probabilité de chacune des transitions.

Si le noyau résultant est dans un état excité qui n'est pas métastable, on observe presque simultanément à la désintégration alpha un rayonnement gamma par désexcitation pour revenir au fondamental. Le schéma de désintégration détaillé des particules indique la probabilité relative de chaque raie et les rayonnements gamma éventuellement associés. [2]

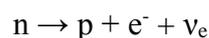
### H.3 Vitesse d'émission de la particule $\alpha$

La masse relativement importante de la particule  $\alpha$  réduit d'autant sa vitesse pour une énergie donnée. Comme l'énergie associée à la radioactivité alpha est toujours inférieure à  $10 \text{ MeV}^1$ , autour de  $5 \text{ MeV}$  dans la majorité des cas – soit une vitesse de  $15\,300 \text{ km/s}$  –, elle n'est pas suffisante pour que les particules  $\alpha$  émises soient relativistes. Ce fait, associé à leur caractéristique de particules chargées ( $Z=2$ ), leur confère une pénétration faible (quelques centimètres dans l'air).

La particule  $\alpha$  ayant une masse non négligeable, une impulsion en réaction est conférée au noyau émetteur qui reste modérée (vitesse de l'ordre de  $280 \text{ km/s}$ ) sans être complètement négligeable. [6]

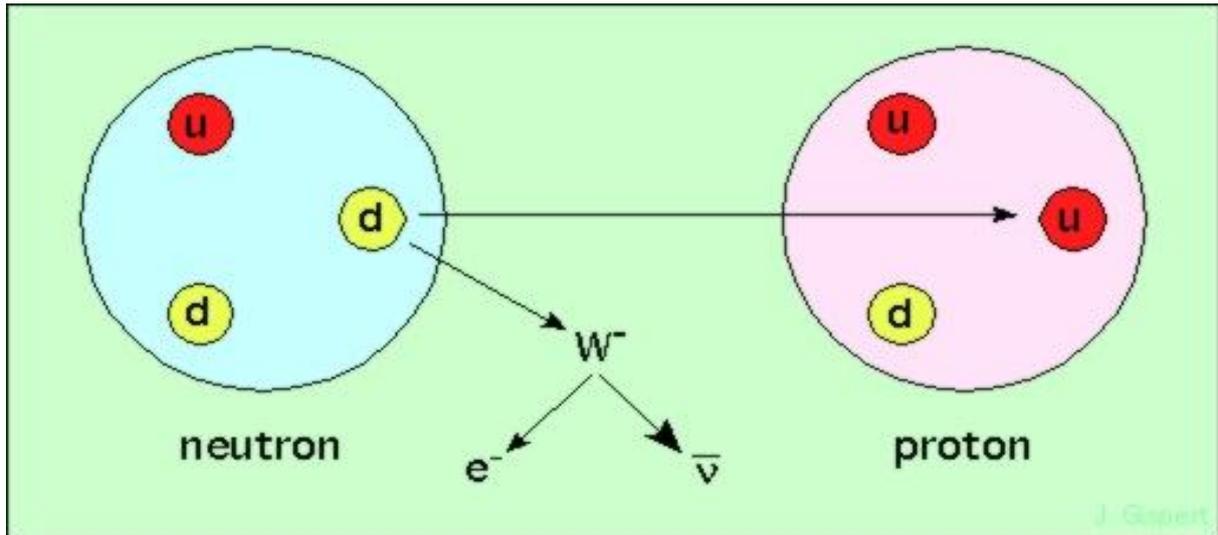
### I) Radioactivité bêta

Dans la radioactivité bêta, un électron est éjecté à la place d'une particule alpha. La réaction s'écrit :



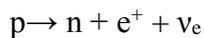
où  $p$  représente un proton (qu'on aurait pu noter aussi  $^1\text{H}$ ),  $n$  un neutron, et  $e^-$  un électron négatif (un véritable électron, celui portant une charge positive étant nommé positron),  $\nu_e$  est un antineutrino électronique. [13] Elle ne porte pas sur un noyau, mais sur un nucléon, qui peut faire partie d'un noyau. Si c'est le cas, le noyau est modifié (il aura un proton de plus, et un neutron de moins). [1]

Cette réaction (figure4) est nommée désintégration  $\beta^-$ . Plus profondément, un quark  $d$  du neutron est changé en un quark  $u$ . Le neutron ( $udd$ ) est donc devenu proton ( $uud$ ). Le changement de saveur du quark s'accompagne de l'émission d'un boson  $W^-$ , qui se désintègre immédiatement en un électron et un antineutrino, complétant la réaction.

Figure 4 désintégration  $\beta^-$  [14]

La réaction notée plus haut est en fait un résumé, qui en regroupe deux.

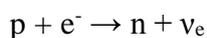
Il existe une radioactivité bêta complémentaire, qui met en jeu le positron, antiparticule de l'électron :



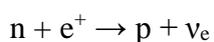
Elle est nommée désintégration  $\beta^+$ . On voit que le proton à gauche porte une charge positive, qui est emportée à droite par le positron. La réaction est donc électriquement équilibrée [6].

Enfin, on note des réactions symétriques des éjections : ce sont des absorptions. Elles sont possibles toujours par l'interaction faible, et justifiées par les mêmes principes :

- un proton absorbe un électron et se transforme en neutron, en perdant sa charge électrique positive :



- un neutron absorbe un positron et se transforme en proton, en perdant sa charge électrique négative :



où  $\nu_e$  représente un antineutrino électronique.

Ces réactions sont très simples à écrire : il suffit d'équilibrer les éléments à gauche et à droite. Ici, la charge doit être conservée, et vous pouvez vérifier, dans la dernière réaction par exemple, que l'on a à gauche neutre (le neutron), et + (le positron), donc une charge positive ; à droite + (le proton) et neutre (le neutrino).[11] Donc un bilan d'une charge positive de chaque côté, la réaction est bien équilibrée.

De plus, l'énergie doit aussi se conserver, ce qui justifie la présence du neutrino (électriquement inutile). C'est d'ailleurs par ces réactions que le neutrino a été imaginé par Enrico Fermi pour équilibrer l'énergie de la réaction, puis observé expérimentalement plus tard.[8]

### J) Radioactivité gamma

La radioactivité gamma, enfin, est simplement une perte d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. La particule éjectée est le photon associé à l'onde. C'est par elle qu'un noyau se désexcite. Le niveau d'énergie d'un photon gamma est bien supérieur aux niveaux de fluorescence, qui concernent les électrons périphériques d'un atome. Le tableau (tableau1) ci-dessous montre les types des radioactivités

Type	particule éjectée	interaction responsable
Alpha	particule alpha	Forte
Béta	électron ou positron	Faible
Gamma	Photon	Electromagnétique

Type des radioactivités 1 [14]

### K) Tableau périodique des éléments

Le tableau périodique des éléments, également appelé table de Mendeleïev, classification périodique des éléments (CPE) ou simplement tableau périodique, représente tous les éléments chimiques, ordonnés par numéro atomique croissant et organisés en fonction de leur configuration électronique, laquelle sous-tend leurs propriétés chimiques .[10]

Son invention est généralement attribuée au chimiste russe Dmitri Mendeleïev, qui construisit en 1869 une table différente de celle qu'on utilise aujourd'hui<sup>N 1</sup> mais similaire dans son principe, dont

le grand intérêt était de proposer une classification systématique des éléments chimiques connus à l'époque en vue de souligner la périodicité de leurs propriétés chimiques, d'identifier les éléments qui restaient à découvrir, et même de pouvoir prédire les propriétés de ces éléments alors inconnus.

Le tableau périodique a (tableau2) connu de nombreux réajustements depuis lors jusqu'à prendre la forme que nous lui

connaissons aujourd'hui, et est devenu un référentiel universel auquel peuvent être rapportés tous les types de comportements physique et chimique des éléments. En novembre 2014, sa forme standard comportait 118 éléments, allant

### The Periodic Table of Improvisation

**Y** 1  
Yes And

**Im** 3  
Impulse

**J** 4  
Joy

**P** 11  
Play

**T** 12  
Trust

**O** 19  
Offers

**Fo** 20  
Focus

**Cn** 21  
Connection

**Eg** 22  
Engager

**Ct** 23  
Commitment

**Ex** 24  
Exploration

**Pr** 25  
Process

**Sw** 26  
Scenework

**Fl** 27  
Flow

**St** 28  
Status

**Pg** 29  
Protagonist

**A** 37  
Acceptance

**Aw** 38  
Awareness

**Op** 39  
Openness

**Ec** 40  
Eye Contact

**Sn** 41  
Sincerity

**Ep** 42  
Expanding

**In** 43  
Insight

**Fg** 44  
Find the Game

**Pe** 45  
Performance

**Pf** 46  
Platform

**Tr** 47  
Tragedy

**Ls** 54  
Listening

**Mg** 55  
Imagination

**Su** 56  
Support

**Jn** 70  
Joining

**Ot** 71  
Optimism

**Ad** 72  
Advancing

**Pt** 73  
Patterns

**Ju** 74  
Justification

**Cr** 75  
Creation

**La** 76  
Laughter

**Cm** 77  
Comedy

**F** 84  
Failure

**Lv** 85  
Love

**Co** 86  
Collaboration

**Gm** 100  
Group Mind

**R** 101  
Receiving

**Gv** 102  
Giving

**Rh** 103  
Rhythm

**Fr** 104  
Format

**Rc** 105  
Recycle

**W** 106  
Wit

**Hu** 107  
Humor

**S** 2  
Story

**B** 5  
Body

**Sa** 6  
Staging

**M** 7  
Mood

**Ob** 8  
Object

**Ta** 9  
Tasking

**Ev** 10  
Environment

**H** 13  
Harold

**V** 14  
Voice

**Ma** 15  
Mantra

**G** 16  
Goal

**Re** 17  
Relationship

**C** 18  
Character

**Ar** 31  
Armando

**Me** 32  
Melanie Game

**Ge** 33  
Genre

**An** 34  
Action

**Br** 35  
Break the Routine

**Cf** 36  
Conflict

**I** 48  
Invocation

**De** 49  
Deconstruction

**Do** 50  
Domino

**Rs** 51  
Raising the Stakes

**E** 52  
Emotion

**Ra** 53  
Rising Action

**Cc** 78  
Cat's Cradle

**To** 79  
Tap Out

**Bs** 80  
Blank Slate

**Lo** 81  
Lotus

**Th** 82  
Theme

**Rz** 83  
Resolution

**Cs** 108  
Comedy-sportz

**Ts** 109  
Theatre-sports

**Mi** 110  
Micro

**Go** 111  
Gorilla Improv

**Lg** 112  
The Life Game

**Mo** 113  
Moral

**D** 57  
David Shepherd

**K** 58  
Keith Johnstone

**Dc** 59  
Del Close

**Ch** 60  
Charna Halpern

**Vs** 61  
Viola Spolin

**Ps** 62  
Paul Sills

**Mn** 63  
Mick Napier

**Rd** 64  
Randy Dixon

**Ab** 65  
Augusto Scal

**Cl** 66  
Colin Mochrie

**Ry** 67  
Ryan Stiles

**Rr** 68  
Rachel Rosenthal

**Cd** 69  
Commedia Dell'arte

**Nm** 87  
Nichols and May

**Jf** 88  
Josephine Forberg

**Pi** 89  
Patti Stiles

**Ga** 90  
Gary Austin

**Mm** 91  
Martin de Maat

**Df** 92  
Dario Fo

**Js** 93  
Jo Salas

**Jx** 94  
Jonathan Fox

**Ac** 95  
Alistair Cook

**At** 96  
Alan Thomhill

**Sp** 97  
Steve Paxton

**Jl** 98  
Jacques Lecoq

**Jc** 99  
John Coltrane

This resource was created by [Dave Morris](#) inspired by [The Periodic Table of Jazz](#) for use by improvisers around the world.

Tableau 2 tableau périodique des éléments [19]

Dans des conditions normales de température et de pression (0 °C, 1 atm) :

- Les éléments dont le numéro atomique est rouge sont gazeux ;
- Les éléments dont le numéro atomique est bleu sont liquides — il n'y en a que deux à 0 °C : le brome (35) et le mercure (80)<sup>N 2</sup> ;
- Les éléments dont le numéro atomique est noir sont solides.

### K.1 Construction du tableau

Dans la mesure où les propriétés physicochimiques des éléments reposent sur leur configuration électronique, cette dernière est sous-jacente à l'agencement du tableau périodique. Ainsi, chaque ligne du tableau (appelée période) correspond à une couche électronique, identifiée par son nombre quantique principal, noté  $n$  : il y a sept couches électroniques connues à l'état fondamental, donc sept périodes dans le tableau périodique standard, numérotées de 1 à 7. Chaque période est elle-même scindée en un nombre variable de blocs, qui correspondent aux orbitales atomiques, identifiées par leur nombre quantique secondaire, noté  $l$  : il y a quatre types d'orbitales atomiques connues à l'état fondamental, notées  $s$ ,  $p$ ,  $d$  et  $f$  (ces lettres viennent d'abréviations utilisées initialement en spectroscopie) et pouvant contenir chacune respectivement 2, 6, 10 et 14 électrons ; c'est la raison pour laquelle on parle de bloc  $s$ , bloc  $p$ , bloc  $d$  et bloc  $f$ .

### K.2 Règle de Klechkowski

Si l'on respecte la construction du tableau par blocs en fonction des orbitales atomiques, l'hélium doit se trouver au-dessus du béryllium dans la colonne 2 (celle dont les atomes ont une sous-couche externe  $ns^2$ ) et non au-dessus du néon dans la colonne 18 (dont les atomes ont une sous-couche externe  $np^6$ ), comme c'est le cas dans la petite table ci-contre ; l'hélium est positionné usuellement dans la colonne 18 car c'est celle des gaz rares, dont il fait chimiquement partie. [7]

Toutes les sous-couches d'une période n'appartiennent pas forcément à la même couche électronique (c'est le cas à partir de la quatrième période) : à partir de la troisième couche électronique, les sous-couches d'une même couche sont en effet réparties sur plusieurs périodes ; les électrons se distribuent en fait sur les différents niveaux d'énergie quantiques autour de l'atome selon un principe d'Aufbau [3] (c'est-à-dire « construction » en allemand) dans des sous-couches électroniques dont l'ordre précis est donné par la règle de Klechkowski

C'est la succession des sous-couches électroniques de chaque période qui détermine la structure du tableau périodique, chaque période étant définie par le retour d'une sous-couche  $s$  suivant une sous-couche  $p$  de la période précédente. [1]

### K.3 Exceptions et règle de Hund

La règle de Klechkowski est observée pour plus de 80 % des 103 éléments dont la configuration électronique à l'état fondamental est connue avec précision, mais une vingtaine d'éléments y font exception. L'état fondamental est en effet par définition celui dont l'énergie est la plus faible, et le spin des électrons entre en jeu pour déterminer cette énergie : plus le spin résultant des électrons

d'une orbitale atomique est élevé, plus la configuration de ces électrons sur cette orbitale est stable (règle de Hund). Il s'ensuit que, pour les éléments du bloc d et du bloc f (métaux de transition, lanthanides et actinides), il est énergétiquement moins favorable de suivre la règle de Klechkowski que de favoriser l'occupation impaire des sous-couches les plus externes lorsque la couche d ou f est vide, à moitié remplie ou entièrement remplie, car l'écart d'énergie entre ces sous-couches est inférieur au gain d'énergie induit par la redistribution des électrons maximisant leur spin résultant

#### **K .4 Périodicité des propriétés chimique**

Le grand intérêt de la classification périodique est d'organiser les éléments chimiques de telle sorte que leurs propriétés physicochimiques puissent être largement prédites par leur position dans la table. Ces propriétés évoluent différemment selon qu'on se déplace verticalement ou horizontalement dans le tableau. [2]

une ligne du tableau périodique. Elle se définit par le remplissage progressif des sous-couches électroniques jusqu'à atteindre la sous-couche s de la couche électronique suivante. Les propriétés des éléments varient généralement beaucoup le long d'une période, mais peuvent être localement assez similaires et constituer des séries chimiques complètes, notamment dans le bloc d (métaux dits « de transition ») et surtout dans le bloc f (lanthanides sur la 6<sup>e</sup> période et actinides sur la 7<sup>e</sup> période).

Un groupe désigne une colonne du tableau périodique. Chacun des 18 groupes du tableau périodique standard (plus le 19<sup>e</sup> groupe des éléments du bloc f, lanthanides et actinides) constitue souvent un ensemble d'éléments aux propriétés bien distinctes des groupes voisins, notamment aux extrémités gauche et droite du tableau périodique (c'est-à-dire dans les blocs s et p) où ils se sont vu attribuer des noms d'usage au cours du temps :

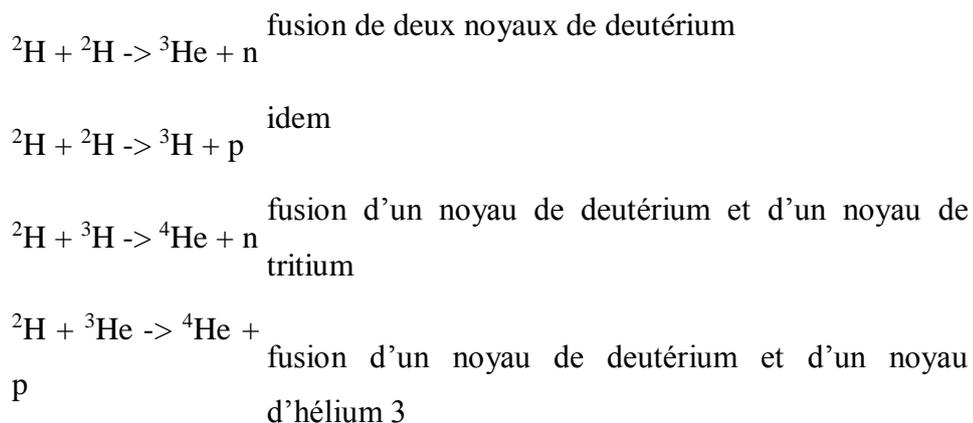
- métaux alcalins = groupe 1 (bloc s) excepté l'hydrogène
- métaux alcalino-terreux = groupe 2 (bloc s)
- cristallogènes = groupe 14 (bloc p)
- pnictogènes = groupe 15 (bloc p)
- chalcogènes = groupe 16 (bloc p)
- halogènes = groupe 17 (bloc p)
- gaz rares = groupe 18 (bloc p) dont l'hélium (bloc s)

Si les termes cristallogène, pnictogène et chalcogène sont aujourd'hui assez désuets, les quatre autres en revanche sont encore très employés car ils se confondent avec des séries chimiques de même nom. [5] [3]

### L) Fusion contrôlée

La recherche de la fusion contrôlée vise à produire énormément d'énergie dans un volume très petit, pour remplacer les énormes machines utilisées à l'heure actuelle (barrages, centrales thermiques...). L'étude des réactions de fusion dans les étoiles a montré la difficulté de réalisation de cette idée. En fait, on ne cherche même pas à reproduire ce qu'il se passe dans le Soleil. On peut dire, pour faire simple, qu'on cherche plutôt à imiter une naine brune. En effet, plutôt que de partir d'atomes d'hydrogène, dont la répulsion électrostatique est trop importante pour être envisageable, on essaye de fusionner des isotopes de l'hydrogène : deutérium et tritium.

Les réactions possibles sont :



Ces différentes réactions se produisent à température plus basse et à densité plus faible que celles de l'hydrogène, ce qui facilite bien les choses. Mais cependant, elles restent très difficiles à réaliser, car la pression nécessaire pour qu'elles se produisent est gigantesque par rapport à la pression ambiante. Il est donc très difficile de maintenir les noyaux dans un très faible volume, et à très haute température, pour que les collisions soient assez nombreuses pour produire de l'énergie.

### M) Datation par le carbone 14

La datation par le carbone 14, dite également datation par le radiocarbone ou datation par comptage du carbone 14 résiduel, est une méthode de datation radiométrique basée sur la mesure de l'activité radiologique du carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ ) contenu dans de la matière organique dont on souhaite connaître l'âge absolu, à savoir le temps écoulé depuis sa mort.

Le domaine d'utilisation de cette méthode correspond à des âges absolus de quelques centaines d'années jusqu'à, et au plus, 50 000 ans<sup>1</sup>. L'application de cette méthode à des événements anciens, tout particulièrement lorsque leur âge dépasse 6 000 ans (préhistoriques), a permis de les dater beaucoup plus précisément qu'auparavant. Elle a ainsi apporté un progrès significatif en archéologie et en paléanthropologie.

Principe de la datation .[11] [16]

Le carbone 14 ou radiocarbone est un isotope radioactif du carbone dont la période radioactive (ou demi-vie) est égale à  $5734 \pm 40$  ans selon des calculs relevant de la physique des particules datant de 1961. Cependant, pour les datations on continue par convention d'employer la valeur évaluée en 1951, de  $5568 \pm 30$  ans<sup>2</sup>. [4]

En première approche, on peut considérer que tant qu'une plante ou un animal est vivant, son organisme échange du carbone avec son environnement si bien que le carbone qu'il contient aura la même proportion de  $^{14}\text{C}$  (carbone 14) que dans la biosphère. Lorsque l'organisme meurt, il ne reçoit plus de  $^{14}\text{C}$  et celui qu'il contient va se désintégrer peu à peu. En deuxième approche, on considère qu'à cause du fractionnement isotopique survenant lors de la photosynthèse, le rapport isotopique  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  de l'organisme est inférieur de quelques pour cents à celui de la biosphère. Durant sa vie, la proportion de  $^{14}\text{C}$  présent dans l'organisme par rapport au carbone total ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  et  $^{14}\text{C}$ ) est donc aisément rapportable à celle existant dans l'atmosphère du moment.

La datation par le carbone 14 se fonde ainsi sur la présence dans tout organisme de radiocarbone en infime proportion (de l'ordre de  $10^{-12}$  pour le rapport  $^{14}\text{C}/\text{C}$  total). À partir de l'instant où un organisme meurt, la quantité de radiocarbone qu'il contient ainsi que son activité radiologique décroissent au cours du temps selon une loi exponentielle. Un échantillon de matière organique issu de cet organisme peut donc être daté en mesurant soit le rapport  $^{14}\text{C}/\text{C}$  total avec un spectromètre de masse, soit son activité X années après la mort de l'organisme.

## Chapitre II : les centrales nucléaire

### 1) Introduction

Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité, qui utilise comme chaudière un réacteur nucléaire pour produire de la chaleur. Comme pour toute centrale thermique conventionnelle, cette chaleur vaporise de l'eau, la vapeur d'eau entraînant en rotation une turbine accouplée à un alternateur qui produit à son tour de l'électricité. C'est la principale application de l'énergie nucléaire dans le domaine civil.

Une centrale nucléaire est constituée d'un ou plusieurs réacteurs nucléaires dont la puissance électrique varie de quelques mégawatts à environ 1 500 mégawatts (860 MW en moyenne pour les réacteurs actuellement en service) .

Au 27 mars 2015, 443 réacteurs sont en exploitation dans 31 pays différents dans le monde (dont 99 aux États-Unis, 58 en France et 48 à l'arrêt au Japon) pour une puissance installée totale de 381 gigawatts nets ; par ailleurs 65 réacteurs sont aussi en construction. En 2013, 10,8 % de l'électricité mondiale était d'origine nucléaire

### 2) Histoire

Années 1950 : premières centrales

La première centrale nucléaire du monde, à avoir produit de l'électricité (puissance de quelques centaines de watts), est l'Experimental Breeder Reactor I (EBR-I), construite au laboratoire national de l'Idaho aux États-Unis. Elle entre en service le 20 décembre 1951. Le 27 juin 1954, une centrale nucléaire civile est connectée au réseau électrique à Obninsk en Union soviétique, avec une puissance de production d'électricité de cinq mégawatts. Les centrales nucléaires suivantes furent celles de Marcoule dans la vallée du Rhône le 7 janvier 1956, de Sellafield au Royaume-Uni, connectée au réseau en 1956, et le réacteur nucléaire de Shippingport aux États-Unis, connecté en 1957. Cette même année, les travaux de construction du premier réacteur à usage civil en France (EDF1) démarrèrent à la centrale nucléaire de Chinon.

## **De 1960 à 1986 : croissance rapide**

La puissance nucléaire mondiale a augmenté rapidement, s'élevant de plus de 1 gigawatt (GW) en 1960 jusqu'à 100 GW à la fin des années 1970, et 300 GW à la fin des années 1980.

Pendant l'année 1970, la construction de 37 nouveaux réacteurs était en cours et 6 étaient mis en service opérationnel. Entre 1970 et 1990 étaient construits plus de 5 GW par an (avec un pic de 33 GW en 1984).

Plus des deux tiers des centrales nucléaires commandées après janvier 1970 ont été annulées notamment comme conséquence de l'accident nucléaire de Three Mile Island

## **1986 : Tchernobyl**

En 1986, la catastrophe de Tchernobyl a conduit à plusieurs moratoires ; la baisse des prix du pétrole durant les années 1990 a renforcé cette tendance, conduisant à construire moins de nouveaux réacteurs dans le monde. Parallèlement, les centrales vieillissent : en 2006, la majorité des réacteurs avaient de 15 à 36 ans, sept ayant de 37 à 40 ans.

Les coûts économiques croissants, dus aux durées de construction de plus en plus longues, et le faible coût des combustibles fossiles, ont rendu le nucléaire moins compétitif dans les années 1980 et 1990. Par ailleurs, dans certains pays, l'opinion publique, inquiète des risques d'accidents nucléaires et du problème des déchets radioactifs, a conduit à renoncer à l'énergie nucléaire.

Le nombre de réacteurs nucléaires en construction dans le monde a commencé à diminuer en 1986, date de la catastrophe de Tchernobyl. Il s'est ensuite stabilisé vers 1994, année à partir de laquelle le taux de mise en construction de nouveaux réacteurs a stagné entre 2 et 3 par an.

**En 1993**, la production d'électricité nucléaire a atteint un record de 17% de la production électrique mondiale, qu'elle n'a plus jamais dépassé depuis lors.

## **Années 2000 : relance annoncée**

À partir du milieu de la décennie 2000, la croissance des besoins en énergie, associée à la remontée des prix des énergies (hausse du prix du pétrole et du gaz, taxe carbone...) a conduit certains experts à annoncer une renaissance du nucléaire en Europe, Asie et Amérique. Par exemple, la Finlande s'est engagée dans la construction d'un réacteur pressurisé européen (EPR) à Olkiluoto depuis 2003, la construction d'un EPR à Flamanville (France) est en cours depuis 2007 et 27 réacteurs sont aussi en construction en Chine

En 2005, seuls 3 nouveaux réacteurs étaient mis en construction dans le monde et 4 réacteurs achevés étaient connectés au réseau. La capacité mondiale a augmenté beaucoup plus lentement, atteignant 366 GW en 2005, en raison du programme nucléaire chinois.

En 2006, mais surtout 2007, la demande repart poussée par les besoins énormes de la Chine en énergie et la hausse généralisée du prix des énergies fossiles

## **2011 : accident nucléaire de Fukushima**

Mais la crise économique depuis 2008, et l'accident nucléaire de Fukushima ont provoqué une baisse de la production d'électricité d'origine nucléaire, de 4,3 % en 2011 par rapport à 2010. Des pays comme l'Allemagne, la Belgique, la Suisse et Taïwan, ont annoncé leur sortie du nucléaire. L'Égypte, l'Italie, la Jordanie, le Koweït, et la Thaïlande ont décidé ne pas s'engager ou se réengager dans le nucléaire. Les chantiers de dix-huit réacteurs en constructions affichent plusieurs années de retard, dont neuf en construction depuis plus de vingt ans.

À la suite de l'accident nucléaire de Fukushima en 2011, un certain nombre de pays ont revu leur politique de développement de l'énergie nucléaire. Par exemple, l'Allemagne (en continuant d'acheter de l'énergie d'origine nucléaire à ses voisins européens) a annoncé sa décision de fermer toutes ses centrales nucléaires avant fin 2022 , l'Italie a abandonné ses projets nucléaires, la Suisse ne renouvellera pas ses centrales, le Québec a fermé sa centrale nucléaire de Gentilly fin 2012, le précédent gouvernement du Japon a annoncé une sortie du nucléaire d'ici 2030, le gouvernement japonais issu des dernières élections est favorable à la remise en service de certaines des centrales nucléaires existantes (aucun réacteur en service actuellement) et ce malgré les résistances de la population , de même la Chine après avoir gelé les autorisations pour de nouveaux réacteurs a décidé, fin 2012, d'une reprise des projets de construction de centrales nucléaires...etc.

Le cycle de vie d'une centrale nucléaire

Du projet de construction au stade de déconstruction final, la vie d'une centrale obéit à un ensemble de procédures très réglementées.

### **3) La construction**

Elle se déroule en 2 phases clés :

#### **1. L'avant-projet**

Les grandes idées de base du projet sont définies (architecture, position, dimension, organisation intérieure...). Parallèlement, une étude du site est menée pour déterminer l'emplacement exact et la

conformité du site avec les critères requis et une procédure administrative est mise en place pour obtenir un décret d'autorisation de création.[16] [14]

## **2. Les études de réalisation**

Elles vont jusqu'à la réalisation des plans d'exécution et se prolongent pendant toute la durée de construction de la centrale.

L'exploitation

En France par exemple, les centrales nucléaires sont conçues pour être exploitées pendant au moins 40 ans.

Pendant cette période, la maintenance est organisée sur 3 niveaux :

- Quotidienne : les différents équipements de la centrale sont surveillés de façon à effectuer les ajustements ou réparations nécessaires.
- Programmée : tous les 18 mois environ, chaque tranche est arrêtée pendant 5 à 6 semaines pour recharger en combustible une partie du cœur du réacteur.
- Décennale : tous les dix ans, une inspection détaillée et complète de la tranche est effectuée, en particulier des principaux composants (cuve, circuit primaire, générateurs de vapeur, enceinte de confinement...). C'est à l'issue de ce bilan que l'Autorité de Sûreté Nucléaire donne l'autorisation de poursuivre l'exploitation du réacteur.

## **4) La déconstruction**

Une fois la période d'exploitation terminée, il s'ensuit un processus de déconstruction en 3 étapes sur 25 ans :

### **4.1. La fermeture sous surveillance**

Les combustibles sont retirés et les circuits d'eau vidangés. Le site reste sous surveillance.

### **4.2. La libération partielle et conditionnelle**

Les installations sont partiellement démontées : les principaux composants du circuit primaire sont isolés et enfermés dans des structures en béton. Le site reste sous surveillance.

## 4.3 La libération totale et inconditionnelle

Environ 10 ans plus tard, le temps de réduire la radioactivité de l'installation, celle-ci est complètement démont

ée. Les matériaux et équipements radioactifs sont évacués. Le site est rendu à son état initial ou utilisé pour une autre installation.

Les coûts de construction d'une centrale nucléaire

## 5) Analyse économique d'une centrale nucléaire

L'analyse économique d'une centrale nucléaire est complexe, et il n'est pas aisé de quantifier coûts et bénéfices avec exactitude. Les coûts (figure 5) de construction et de fonctionnement dépendent fortement du type de centrale et du temps imparti à la construction. L'« overnight capital cost », qui représente symboliquement les coûts nécessaires pour construire la centrale nucléaire en une nuit, s'affranchissant ainsi du coût du capital, est de \$3500/kW pour un AP1000, réacteur de 3ème génération à eau pressurisée, et de \$3400/kW pour un EPR. Cependant, les délais de constructions diffèrent fortement : ainsi, la construction d'une centrale AP1000 dure 36 mois tandis que l'EPR prend plus de 60 mois, avec un impact direct sur les coûts d'investissements par les coûts du capital en découlant. D'une manière générale, les différents coûts du nucléaire [19]

peuvent être séparés dans les catégories suivantes :

- Coûts d'investissement pour la construction
- Coûts de fonctionnement
- Coûts de gestion des déchets
- Coûts de démantèlement

Cash flow durant la vie d'une centrale nucléaire

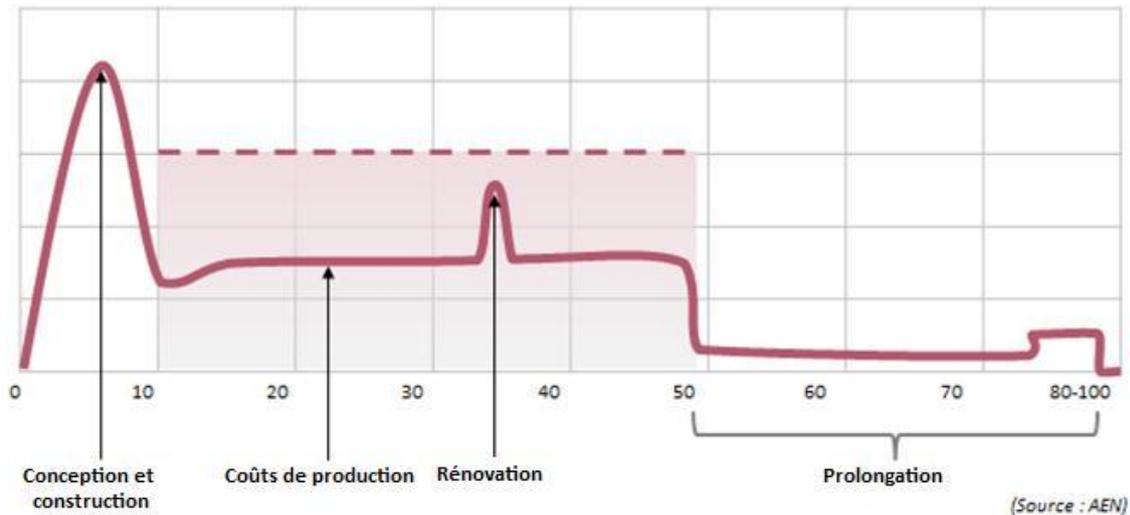


Figure 5 chash flow durant la vie d'une centrale nucléaire [20]

Le véritable défi réside dans les hauts coûts d'investissements à fournir au début de la construction de la centrale, soit 65% à 75% du coût total. Ces coûts de financement sont les plus élevés et dépendent du taux d'intérêt de l'endettement. Une fois que la centrale est construite, elle fonctionne avec des coûts raisonnables et est considérée par certains comme une « machine à cash ». La gestion des déchets radioactifs représente 2%-3% du coût global. Quant aux coûts de démantèlement, ils sont souvent intégrés par avance au prix à laquelle l'électricité est vendue au consommateur, et sont estimés entre 10 à 15%. Des coûts nivelés pour l'électricité générée [21]

Comme écrit ci-dessus, certains considèrent une centrale nucléaire comme une « machine à cash ». d'autres affirment que « le cout de l'énergie nucléaire est compétitif avec les autres formes de génération d'électricité, exception faite de l'accès direct aux énergies fossiles peu chères ». Actuellement, des études investiguent la compétitivité du prix d'une centrale nucléaire en y incluant le prix du CO<sub>2</sub>. L'introduction d'une taxe carbone ou d'un système d'échange d'émissions de CO<sub>2</sub> influencerait ainsi beaucoup le climat d'investissement.[17]

Le climat d'investissement change Avec des investissements d'une telle taille, une analyse profonde doit être menée et prendre en compte les risques potentiels. Quelques décennies auparavant les risques de l'investissement dans une centrale nucléaire étaient portés par des monopoles publics ou gouvernementaux régulés. Suite à la libéralisation des marchés de l'énergie, ce sont de plus en plus souvent des compagnies privées qui prennent les risques dans cet environnement hautement compétitif, menant à une nouvelle façon d'adresser et d'évaluer les risques économiques d'une nouvelle centrale nucléaire. Notamment à cause de la catastrophe de Fukushima en 2011, il est

probable que les coûts de fonctionnement vont augmenter suite à une réglementation durcie envers la sécurité. Se pose la question de l'évolution des prix de l'électricité. Pour l'instant, cet environnement changeant et incertain résulte dans la prudence des investisseurs. Le futur nous dira si cette attitude ne sera que temporaire.

## 6) Les centrales nucléaires dans le monde

### 6.1 Liste de réacteurs nucléaires

La liste de réacteurs nucléaires regroupe les réacteurs nucléaires construits dans le monde, qu'ils soient en fonctionnement, à l'arrêt ou bien démantelés. Ils sont classés par pays et par fonction : soit pour les applications militaires, soit pour la production d'électricité dans une centrale nucléaire (réacteur dit de puissance), soit pour la recherche. L'Océanie est le seul continent (comme il est montré dans la (figure 6)) à ne pas compter de réacteur nucléaire.

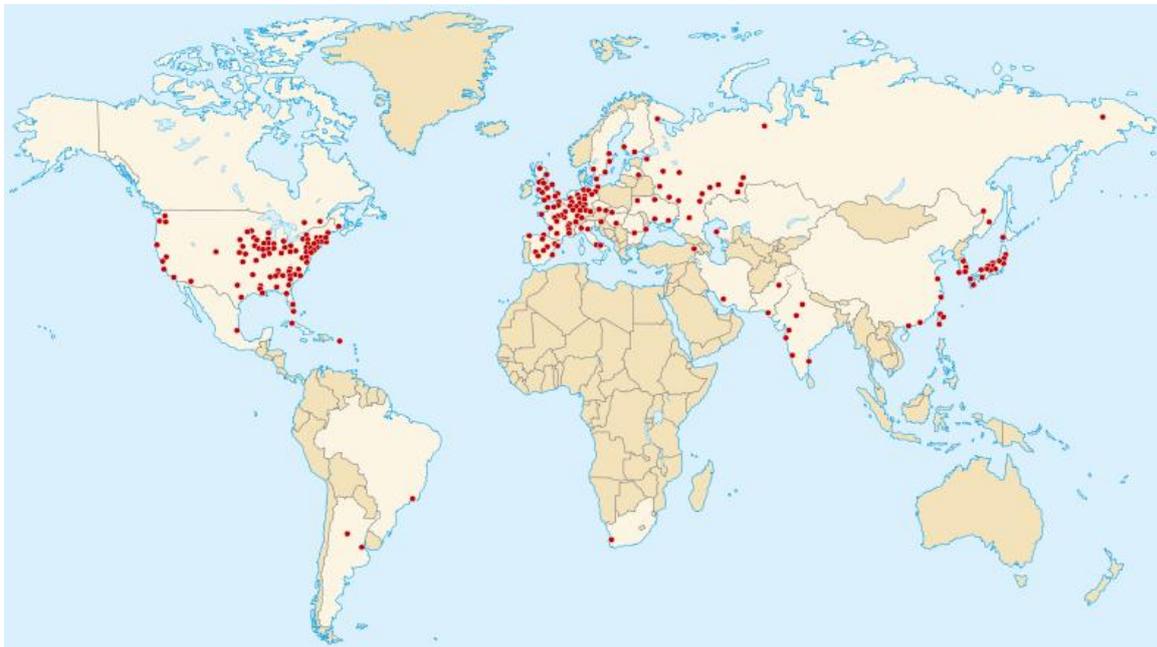


Figure 6 Centrales nucléaires dans le monde en 2008 [19]

### 6.1.1 Réacteurs nucléaires militaires

En 2002, les cinq grandes puissances nucléaires (États-Unis, Russie, Royaume-Uni, France et Chine) disposaient de 245 réacteurs nucléaires militaires sur 182 bâtiments de guerre. Entre 1954 et 2002, environ 760 réacteurs nucléaires servant à propulser des navires de guerre ont été construits dans le monde. Dans cette liste ne figurent pas les réacteurs nucléaires utilisés pour la production de plutonium, ni ceux embarqués sur des satellites (source : CDRPC).

### 6.1.2 Réacteurs nucléaires civils

Dénombrement et âge

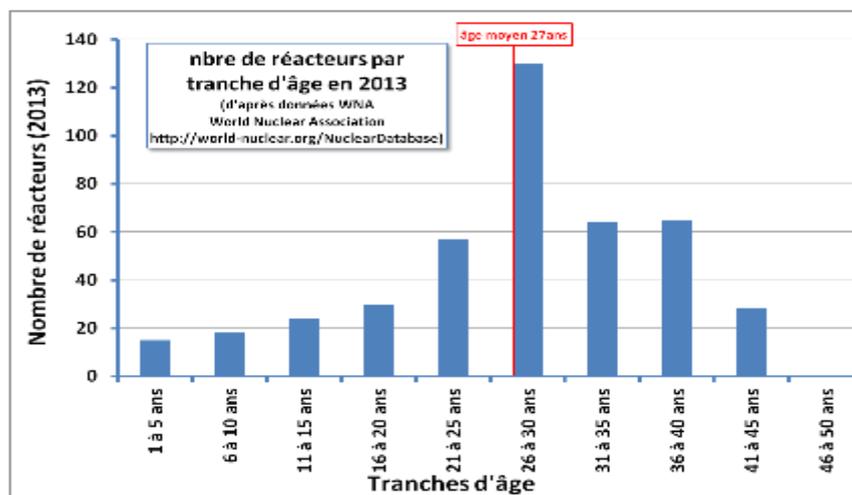


Figure 7 Âge des réacteurs nucléaires dans le monde en 2013 [20]

(figure7) montre l'âge des réacteurs nucléaires. Au 1<sup>er</sup> avril 2012, 436 réacteurs de puissance fonctionnent dans vingt-huit pays différents dans le monde et 61 sont par ailleurs en construction. À eux seuls quatre pays (États-Unis, France, Japon et Russie) disposent de 244 réacteurs soit 56 % du nombre total de réacteurs dans le monde. [21]

La répartition par filière est la suivante : 272 réacteurs à eau pressurisée, 84 réacteurs à eau bouillante, 47 réacteurs à eau lourde pressurisée, 2 réacteurs à neutrons rapides, 16 réacteurs refroidis au gaz (GCR) et 15 réacteurs refroidis à l'eau légère et modérés au graphite (LWGR).

L'accident nucléaire de Fukushima a eu un impact sur le nombre de réacteurs en service au Japon (4 réacteurs détruits et 42 réacteurs à l'arrêt), en Allemagne (8 réacteurs définitivement arrêtés) et au Royaume-Uni (1 réacteur arrêté). Toutefois parallèlement plusieurs réacteurs ont été mis en service

dans certains pays en 2011 après l'accident de Fukushima (1 au Pakistan, 3 en Chine, 1 en Iran et 1 en Russie) et en 2012 (2 en Corée du Sud).

Le tableau ci-dessous (tableau3) récapitule le nombre de centrales et de réacteurs nucléaires en activité au 1<sup>er</sup> avril 2012. Il ne tient pas compte des réacteurs de recherche.

Rang en nb	Pays	Nb centrales	Nb réacteurs	Age moyen	>30 ans en avril 2012	>40 ans en avril 2012
1	USA	70	104	32,3	60	9
2	France	19	58	27,1	21	0
3	Japon	15	50	25,4	17	2
4	Russie	10	33	28,2	17	1
5	Corée du Sud	4	23	16,7	1	0
6	Inde	7	20	18	4	2
7	Canada	5	18	28	4	1
8	Royaume-Uni	10	17	29,6	5	1

Tableau 3 le nombre de centrales [19]

## 7) Les différents types de réacteurs

Une centrale nucléaire est équipée d'un ou plusieurs réacteurs nucléaires, ceux-ci peuvent appartenir à diverses filières :

- réacteur à eau bouillante, modéré au graphite de conception soviétique (RBMK)
- réacteur à uranium naturel, modéré par du graphite, refroidi par du dioxyde de carbone (filière uranium naturel graphite gaz ou UNGG) ; dont le premier réacteur à usage civil en France (EDF1). Cette filière fut abandonnée pour la filière REP pour des raisons économiques. Les centrales françaises de ce type sont actuellement toutes à l'arrêt ; par contre, certaines centrales britanniques du même type (Magnox, AGR) sont encore en service ;
- réacteur utilisant de l'uranium naturel modéré par de l'eau lourde (filière canadienne CANDU) ;
- réacteur à eau pressurisée (REP) (PWR en anglais) ; ce type de réacteur utilise de l'oxyde d'uranium enrichi comme combustible, et est modéré et refroidi par de l'eau ordinaire sous pression. Les REP constituent l'essentiel du parc actuel : 60 % dans le monde et 80 % en Europe. Une variante en est le réacteur à eau pressurisée de conception soviétique (WWER) ;
- réacteur à eau bouillante (REB) (BWR en anglais) ; ce type de réacteur est assez semblable à un réacteur à eau pressurisée, à la différence importante que l'eau primaire se vaporise dans le cœur du réacteur et alimente directement la turbine, ceci en fonctionnement normal ;
- réacteur à eau lourde pressurisée (PHWR) ;
- réacteur avancé à gaz (AGR) ;
- réacteur nucléaire à neutrons rapides et à caloporteur sodium, comme le Superphénix européen ou le BN-600 russe

Les réacteurs nucléaires ont été classés en plusieurs générations en fonction de l'âge de leur conception:

- Les réacteurs actuellement en service sont dits de génération II (voire I pour les plus anciens; e.g. Magnox au Royaume-Uni).
- Les réacteurs actuellement en construction (EPR, AP1000) sont dits de génération III ou III+ (voire II+ pour les CPR1000 chinois).
- Les réacteurs de génération IV sont à l'étude.

## 8) les impacts environnementaux d'une centrale nucléaire

Des rejets de chaleur importants

Les impacts environnementaux ne se limitent pas aux catastrophes de Tchernobyl et de Fukushima. Le rendement d'une centrale nucléaire est de 34%. Un rendement aussi faible, combiné à une puissance aussi élevée font qu'une centrale de 1000 MW rejette environ 2000 MW de chaleur. C'est plus qu'il n'en faut pour chauffer une ville moyenne de 100 000 habitants ! Comparativement, pour une même production d'électricité, une centrale à haut rendement de 52% rejette deux fois moins de chaleur.[20]

Il convient de préciser dès à présent que les centrales thermiques au charbon et au gaz sont aussi susceptibles de rejeter de la chaleur dans les rivières ou l'atmosphère. Le chauffage de l'environnement ambiant est avant tout une fonction de la puissance de la centrale, du rendement du cycle employé et du dispositif de refroidissement choisi. Il ne dépend pas de l'énergie primaire utilisée. [20] [13]

Ces rejets de chaleur engendrent une nuisance directe sur l'environnement direct. En effet, une partie de la chaleur dégagée est évacuée dans les eaux de surface au bord desquelles les centrales sont installées. Ensuite, ce rejet supplémentaire de chaleur contribue à renforcer l'excès d'énergie à la surface de la terre, ce qui contribue au changement climatique (voir le dossier Domestiquer l'effet de serre).

Une autre point faible des centrales électronucléaires est qu'elles n'utilisent pas la cogénération. Dans le cas de la cogénération, la chaleur rejetée est réutilisée pour chauffer des logements ou pour des applications industrielles. Il est alors possible d'obtenir des rendements de 80 à 90%. Cependant, comme les centrales nucléaires ont été construites loin des centres urbains, la chaleur ne peut pas être utilisée pour chauffer les villes. Ce n'est pas le cas pour les centrales à gaz ou à charbon. Pourtant un peu d'ingéniosité devrait permettre de trouver un débouché pour la chaleur « nucléaire » ! Etant donné que la chaleur supporte mal le transport sur de longues distances, il convient donc de trouver des applications locales. L'absence de cogénération dans ce cas participe activement au gâchis énergétique de nos sociétés. En effet, la chaleur dégagée aurait pu être valorisée. A la place, ces 2000 MW ne s'ajoutent pas à la production énergétique globale. Ils devront donc être fournis par des centrales au charbon, au gaz ou même par chauffage électrique provenant du nucléaire ! [13]

### 8.1 Rejets radioactifs et déchets

Toutes les installations nucléaires rejettent de la radioactivité dans l'environnement (fig8). Ces pollutions contaminent les fleuves, les océans, les nappes phréatiques et l'air (Les déchets, le cauchemar du nucléaire). Les centrales nucléaires françaises produisent environ 200 tonnes de déchets de haute activité par an, c'est-à-dire à peu près le volume de 4 ou 5 voitures. Ces déchets ultimes représentent 4% du volume, mais contiennent 99 % de la radioactivité du combustible utilisé. [18]

Des convois routiers ou ferroviaires chargés de combustibles et de déchets nucléaires traversent la France et des déchets sont stockés un peu partout dans le pays. Il va falloir stocker ces déchets durant des milliers d'années. On parle de 200 000 ans. Cependant, leur activité décroît au cours du temps et ils ne sont pas aussi dangereux tout au long de leur vie. Ainsi, les 1 000 premières années sont les plus dangereuses. Ensuite, les déchets atteignent un niveau de radioactivité proche de celui qui a été initialement placé dans le réacteur.



Figure 8 Fût de déchet abandonné au fond de la mer. [19]

### 8.2 L'eau n'est-elle pas le plus grand gaz à effet de serre ?

Les émissions directes de vapeur d'eau des centrales électriques (pas seulement nucléaires !) et de toutes les autres activités anthropiques ne contribuent pas à augmenter l'effet de serre de manière décelable. La Terre est couverte à plus de 70% d'eau et le temps de séjour de l'eau dans l'atmosphère est d'une seule semaine. Les émissions humaines sont donc marginales dans le cycle global de l'eau. La situation est très différente pour le CO<sub>2</sub> qui n'est présent qu'à hauteur de 0,038 % et qui a un temps de séjour dans l'atmosphère de plusieurs dizaines d'années. Cela explique

pourquoi la vapeur d'eau n'est pas prise en compte

lorsque l'on calcule les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines.

## Chapitre III : instrumentation de centrale nucléaire

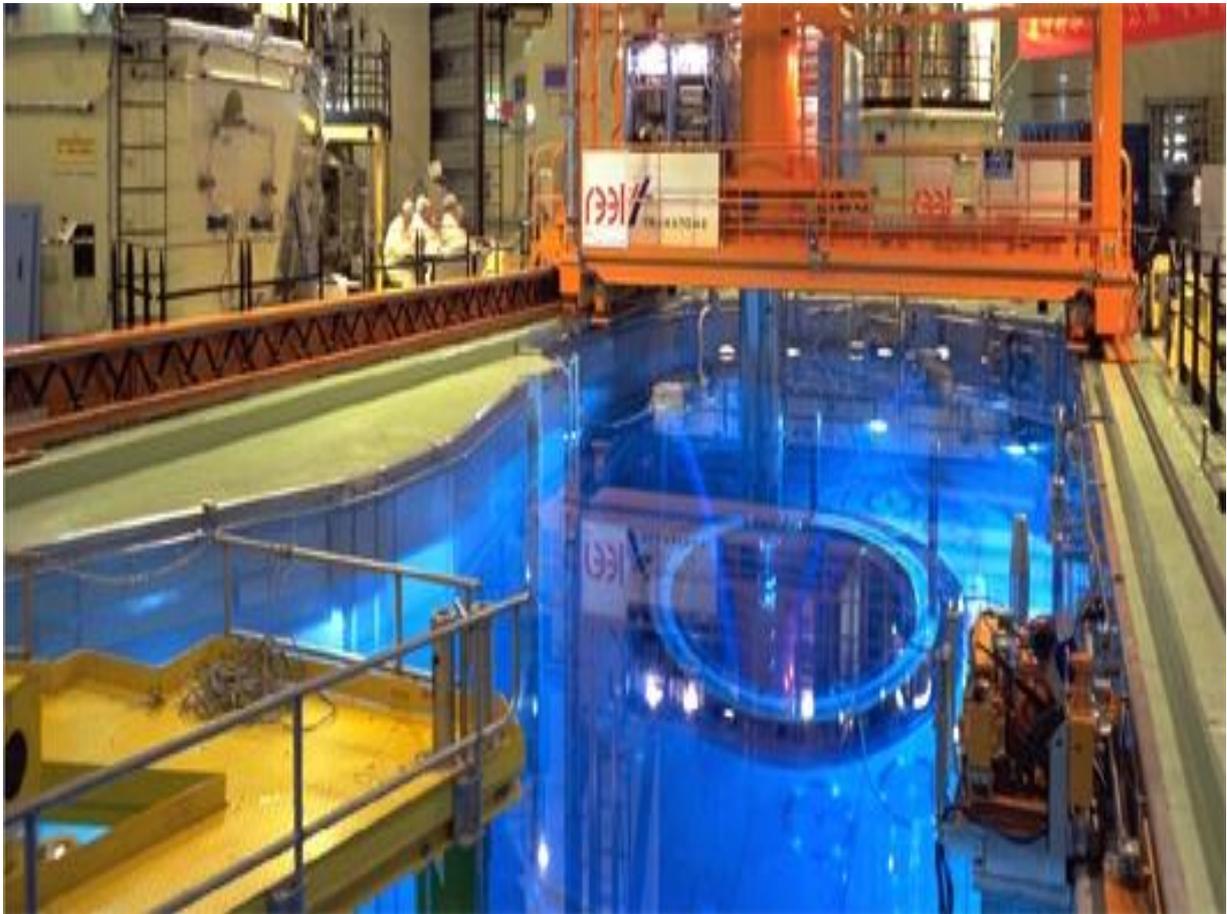


Figure 9 une centrale nucléaire [18]

### 1) Introduction

Une centrale nucléaire (fig 9) regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité sur un site donné. Elle comprend fréquemment plusieurs tranches, identiques ou non ; chaque tranche correspond à un groupe d'installations conçues pour fournir une puissance électrique donnée.

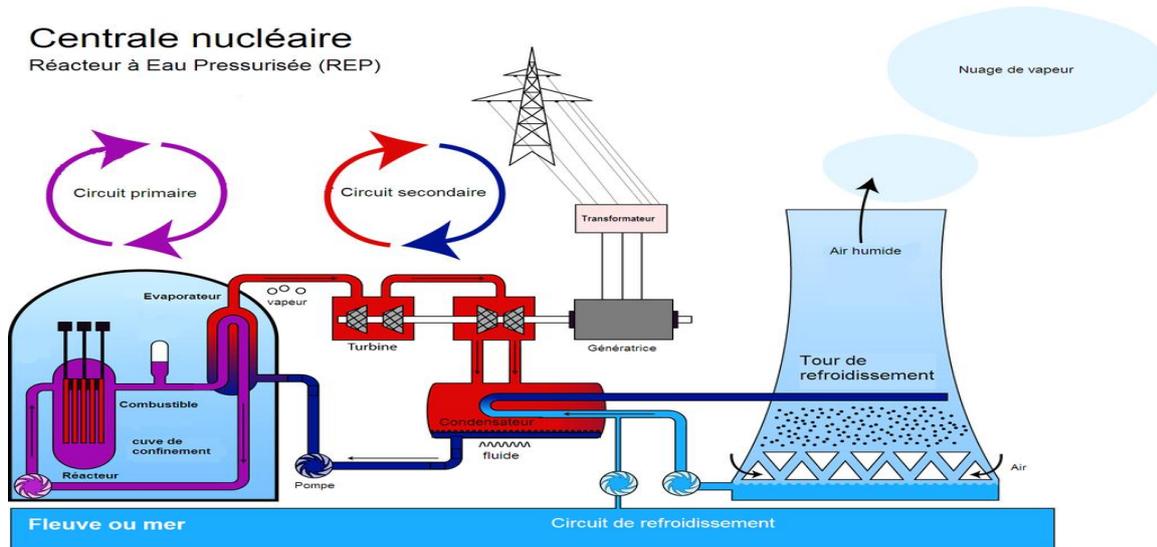


Figure 10 schéma d'une centrale nucléaire [19]

## 2) Les composants d'une centrale nucléaire

Ce schéma (figure 10) qui montre Une centrale nucléaire comprend généralement:

**le bâtiment réacteur**, généralement double enceinte étanche qui contient le réacteur nucléaire, le pressuriseur qui a pour fonction de maintenir l'eau (traitée) du circuit primaire à l'état liquide, les générateurs de vapeur (trois ou quatre selon la génération), les pompes primaires servant à faire circuler le fluide caloporteur (eau), le circuit d'eau primaire, dont le rôle principal est d'assurer le transfert thermique entre le cœur du réacteur et les générateurs de vapeur, et une partie du circuit d'eau secondaire [18] ;

**le bâtiment combustible** : collé au bâtiment réacteur, il sert de stockage des assemblages du combustible nucléaire avant, pendant les arrêts de tranche et pour le refroidissement du combustible déchargé (un tiers du combustible est remplacé tous les 12 à 18 mois). Le combustible est maintenu immergé dans des piscines dont l'eau sert d'écran radiologique ;

**le bâtiment salle des machines**, qui contient principalement :

une ligne d'arbre comprenant les différents étages de la turbine à vapeur et l'alternateur (groupe turbo-alternateur),

**le condenseur**, suivi de turbopompes alimentaires (fonctionnement normal, de secours) ;

**les locaux périphériques d'exploitation** (salle de commande...) ;

**des bâtiments annexes** qui contiennent notamment des installations diverses de circuits auxiliaires nécessaires au fonctionnement du réacteur nucléaire et à la maintenance, les tableaux électriques alimentant tous les auxiliaires et générateurs Diesel de secours [18]

**une station de pompage** pour assurer les besoins en eau.

**une ou plusieurs tours de refroidissement**, généralement la partie la plus visible des centrales thermiques, dont la hauteur. Ces aéroréfrigérants n'équipent que les centrales dont la source froide ne permet pas d'évacuer la chaleur nécessaire au fonctionnement et permettent ainsi de diminuer la pollution thermique de cette source froide. La hauteur de ces réfrigérants peut être réduite pour des raisons visuelles (par exemple, compte tenu de la proximité des châteaux de la Loire, pour les centrales de Chinon où la hauteur des tours à tirage induit ne dépasse pas 30 m et de Saint-Laurent-des-Eaux où la hauteur a été limitée à 120 m) au prix d'une diminution du rendement de la centrale.

**Les autres installations de la centrale électrique comprennent :**

**un ou plusieurs postes électriques** permettant la connexion au réseau électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs lignes à haute tension, ainsi qu'une interconnexion limitée entre tranches ;

**les bâtiments** technique et administratif, un magasin général...

### 3) les 3 circuits d'eau dans une centrale nucléaire

#### 3.1 Le circuit primaire

##### L'instrumentation de Circuit primaire

La boucle l'élément fondamental du circuit primaire (Figure 11)



Figure 11 visualisation 3D de boucle primaire [15]

Chaque boucle du circuit primaire est raccordée à la cuve du réacteur et se compose d'une pompe primaire, d'un générateur de vapeur et de tuyauteries qui relient ces équipements. A cela vient s'ajouter un pressuriseur, relié à l'une des boucles primaires, celui-ci a pour rôle de maintenir automatiquement la pression pour éviter que l'eau n'entre en ébullition.

L'eau est mise en circulation par la pompe primaire et un moteur électrique, et chemine à travers une des boucles primaires depuis le coeur du réacteur où elle est chauffée par les fissions du combustible inséré dans la cuve. Une fois sortie de la cuve, cette eau traverse l'ensemble des tuyauteries qui la conduisent vers le générateur de vapeur où elle cède sa chaleur, puis elle est dirigée vers la pompe primaire, cette dernière reconduisant l'eau de nouveau dans le coeur.

### 3.1.1 La cuve et ses équipements internes

Caractéristiques techniques de la cuve :

Poids : 420 tonnes , Hauteur : 10.6 m , Diamètre : 5.3 m , Température :  $>300^{\circ}\text{C}$



Figure 12 cuve du réacteur[15]

La cuve du réacteur (figure 12) est le composant principal du circuit primaire. Enceinte en acier étanche de forte épaisseur, elle renferme le cœur du réacteur et les systèmes de contrôle de la réaction. Au sein de la cuve, le fluide caloporteur extrait la chaleur produite par la réaction nucléaire puis la transmet à l'eau du circuit secondaire dans le générateur de vapeur.

L'épaisseur de la paroi en acier au carbone de la cuve (de 20 à 30 cm) et les gaines en acier inoxydable garantissent le confinement des réactions internes.[15]

### 3.1.1 A. Les équipements internes

Les équipements internes de la cuve (fig13) supportent quant à eux les assemblages de combustible et assurent que leur position et orientation dans le cœur sont correctes ; cela afin que les grappes de commande et l'eau primaire puissent remplir leurs rôles respectifs de contrôle de la réactivité et d'extraction de la chaleur du cœur en toutes circonstances, y compris dans l'hypothèse de situations accidentelles.

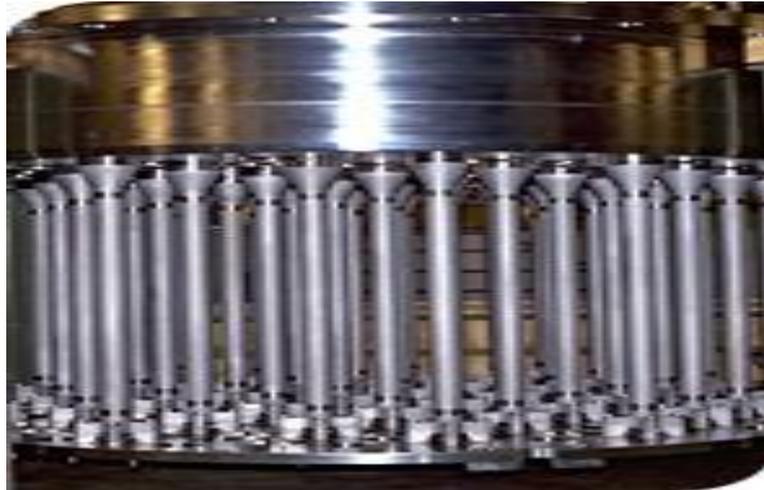


Figure 13 les équipements internes de la cuve [15]

Principaux composants des équipements internes :

- les équipements internes supérieurs :
- guides de grappes,
- plaque-support supérieure,
- plaque supérieure de cœur

### 3.1.1 B les équipements internes inférieurs :

- enveloppe et plaque inférieure de cœur
- le réflecteur lourd.

entre dans le GV par la boîte à eau à environ 320°C, circule dans les tubes où elle cède sa chaleur au fluide secondaire et ressort de l'autre côté de la boîte à eau à environ 280°C. L'énergie ainsi cédée permet de transformer l'eau liquide, provenant des tores d'alimentation et s'écoulant par gravité vers

le bas, en vapeur qui s'échappe vers la turbine par la partie supérieure de l'équipement.

### 3.1.1. C le couvercle de la cuve

Caractéristiques techniques du couvercle de cuve :

Poids : 116 tonnes non assemblé , Hauteur : env. 10m , Diamètre : 5.7 m



Figure 2 le couvercle de la cuve [15]

Pesant plusieurs tonnes et revêtus d'acier inoxydable, les couvercles de cuve (figure 14) constituent une barrière de protection entre le combustible à l'intérieur de la cuve et le monde extérieur. La présence de perforations usinées avec précision permet par ailleurs le passage des mécanismes (les barres de contrôle) régulant la réaction nucléaire. [15]

La conception des couvercles doit donc assurer efficacement et en toute sécurité cette double fonction d'étanchéité et de traversée.

### 3.1.1. D Barre de contrôle

Une barre de contrôle ou barre de commande (fig 15) est une « pièce mobile» de matériau neutrophage, servant à diminuer le Facteur de multiplication des neutrons par capture stérile de neutrons ; ces absorbants neutroniques permettent ainsi de contrôler des réactions en chaîne dans l'industrie nucléaire.



Figure 15 barre de controle [15]

## Principe de fonctionnement

Un des moyens de contrôle du flux neutronique d'un réacteur nucléaire à eau légère (REP, REB, etc.) est l'insertion ou le retrait de ces barres de contrôle au sein des assemblages de crayons de combustible où elles sont précisément positionnées par des vérins ou systèmes d'électroaimants et dans l'assemblage par le rôle d'entretoises des grilles et de ressorts conçus pour bien les positionner tout en limitant leur usure par frottement. En absorbant des neutrons le flux neutronique diminue, le nombre de fissions dans le cœur diminue ce qui entraîne une baisse de la puissance thermique du cœur.

### 3.1.2 Les générateurs de vapeur

Le générateur de vapeur

Caractéristiques techniques :

Poids : > 550 tonnes   Hauteur : 25   Diamètre : 5.2 m



Figure 16 Les générateurs de vapeur [15]

Les quatre générateurs de vapeur (GV) (figure16) un dans chaque boucle - constituent l'interface d'échange de chaleur entre l'eau primaire, chauffée par le combustible nucléaire, et l'eau secondaire qui, à l'état de vapeur, entraîne le turboalternateur. L'eau du circuit primaire qui reste sous forme liquide de par la pression [15]

### 3.1.3 Les tuyauteries primaires

Il s'agit des tuyauteries (fig17) des quatre boucles du circuit primaire et de la ligne d'expansion du pressuriseur. Les tuyauteries des boucles permettent à l'eau primaire de circuler de la cuve aux générateurs de vapeur, puis de ceux-ci aux groupes motopompes primaires et, sous l'impulsion de ces derniers, de retourner à la cuve. La ligne d'expansion relie le pressuriseur à l'une des quatre boucles.

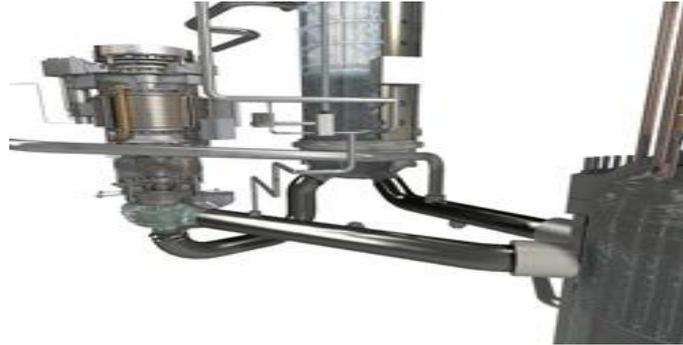


Figure 3 Les tuyauteries primaires [15]

Chaque boucle primaire comprend :

- une branche chaude de la cuve à un générateur de vapeur
- une branche dite en « U » du générateur de vapeur au groupe motopompe primaire
- une branche froide du groupe motopompe à la cuve

### 3.1.4 Les groupes motopompes primaires

Caractéristiques techniques : Poids : > 110 tonnes Hauteur : 9.3 m

Les groupes primaires (GMPP) (figure18) assurent la circulation forcée de l'eau primaire afin que la chaleur produite dans le cœur du réacteur soit transmise aux générateurs de vapeur pour y être cédée à l'eau du circuit secondaire. [14]



Figure 4 Les groupes motopompes [15]

Chacune des quatre boucles du circuit primaire est équipée d'un GMPP (fig 19) situé entre la sortie du générateur de vapeur et l'entrée de la cuve.

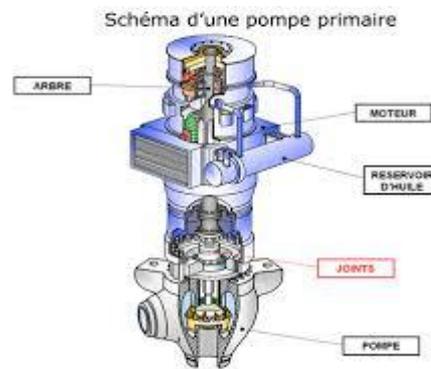


Figure 19 [19]

Le GMPP est constitué de trois parties :

- la cellule hydraulique
- le système d'étanchéité d'arbre
- le moteur.

### 3.1.5 Le pressuriseur

Caractéristiques techniques : Poids : > 160 tonnes , Hauteur : > 14 m , Diamètre : 3 m



Figure 20 le pressuriseur [15]

Le pressuriseur (figure 20) a pour rôle de maintenir la pression du circuit primaire dans un domaine de valeurs prescrit. Il fait partie de ce circuit et une tuyauterie, dite ligne d'expansion, le relie à la branche chaude d'une des quatre boucles primaires.

### 3.2 Circuit secondaire :

L'eau du circuit primaire transmet sa chaleur à un autre circuit fermé, par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. La vapeur fait tourner une turbine, qui elle-même entraîne un alternateur produisant de l'électricité. La vapeur est ensuite refroidie, retransformée en eau et renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle.[19]

#### 3.2.1 La turbine à vapeur

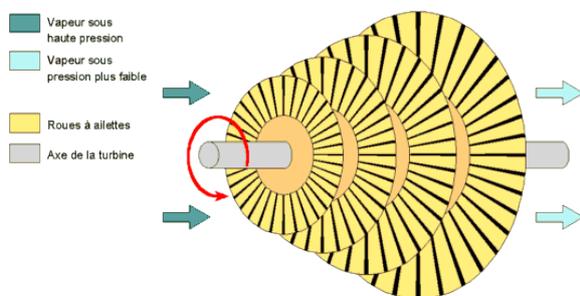


Figure 22 Schéma d'un turbinateur à vapeur [19]



Figure 21 turbine à vapeur [18]

Une turbine à vapeur (figure 22.21) est constituée d'un grand nombre de roues ( une centaine pour un modèle de puissance ) portant des ailettes. La vapeur sous pression traverse d'abord les roues de petit diamètre avant d'atteindre les roues de plus grand diamètre. La turbine tourne alors en entraînant l'alternateur qui lui est accouplé.

#### 3.2.2 L'alternateur

Un turbo-alternateur (figure 23) est l'accouplement d'une turbine et d'un alternateur en vue de transformer la puissance mécanique de vapeur en mouvement, puis en électricité.

**les composants d'un alternateur**

A-Générateur

B-Turbine

1-Stator

2-Rotor

3-Vannes réglables

4-Pales de la turbine

5-Flux d'eau

6-Axe de rotation

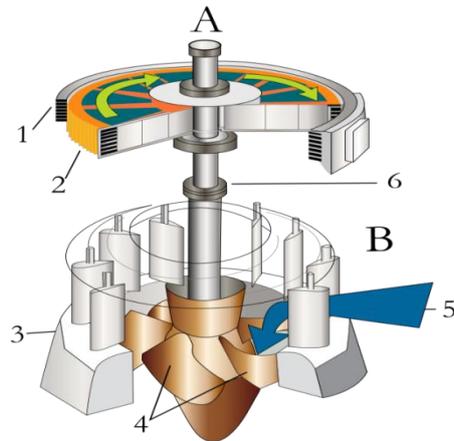


Figure 23 shema alternateur [19]

un alternateur (figure 24) possède deux éléments distincts essentiels : le stator et le rotor .

– le stator pièce statique c'est à dire qui ne tourne pas dans l'alternateur stator provient de statique qui veut dire immobile est une bobine de cuivre donc conductrice et sensible aux phénomènes électromagnétiques. [15]

– le rotor pièce qui tourne rotor provient de rotation qui signifie en mouvement tournant est un aimant qui produit un champ magnétique . cette pièce possède un axe. cet axe est solidaire du rotor et lorsque l'axe est entraîné, il fait tourner le rotor.[16]



Figure 24 un alternateur dans un centrale nucléaire [15]

### 3.3 Circuit de refroidissement

À la sortie de la turbine, la vapeur du circuit secondaire est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. Ce troisième circuit est appelé circuit de refroidissement. En bord de rivière, l'eau de ce 3<sup>e</sup> circuit peut alors être refroidie au contact de l'air circulant dans de grandes tours, appelées aéroréfrigérants.

#### 3.3.1 Le condenseur

Un condenseur (figure 25) est un appareil dont la fonction principale est de condenser (transformation d'un vapeur en liquide) sur une surface froide, ou via un échangeur thermique maintenu froid par la circulation d'un fluide réfrigérant. La chaleur latente du corps est transférée dans le fluide réfrigérant, ce qui consiste en un changement de phase à température constante. Le fluide réfrigérant varie en fonction du débit vapeur à condenser et de la température de condensation du gaz : air, eau, saumure.



Figure 25 condenseur [15]

##### 3.3.1.A Principes de fonctionnement

Les condenseurs sont souvent des échangeurs de chaleur à calandre et faisceau tubulaire.

La condensation se fait presque systématiquement dans la calandre. On utilise généralement des tubes d'un centimètre de diamètre et de longueur comprise entre 2 et 6 mètres, avec un pas triangulaire ou un pas carré. Un des critères pour ces choix est souvent la perte de charge, surtout pour des appareils travaillant à pression réduite. Dans le cas d'une pompe à chaleur, le fluide frigorigène, après avoir emmagasiné de la chaleur et s'être évaporé dans l'évaporateur, circule dans un circuit fermé. Ensuite, il passe à proximité d'une source plus fraîche (air, sol ou eau) et ainsi se condense pour refaire un

cycle.[19]Cet échangeur de chaleur permet la condensation du fluide frigorigène. Ce phénomène exothermique permet de restituer de la chaleur au médium (eau, air...), donc de le réchauffer. C'est par exemple le cas dans une chaudière à condensation.

### 3.3.2 Cellule métallique

Schéma d'une cellule aéroréfrigérante :

- A : bâti
- C: ventilateur
- E : clayettes
- B : entrées d'air
- D : rampes d'arrosage
- F : bassin de rétention

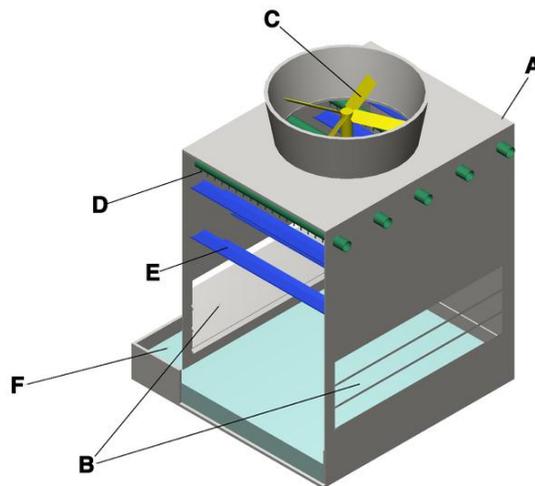


Figure 26 Cellule métallique [19]

Le schéma de (figure 26) montre Une tour aéroréfrigérante peut être constituée d'une enceinte métallique située au-dessus de la réserve d'eau refroidie et de ventilateurs (tirage forcé) ; l'eau à refroidir étant amenée par une conduite à une certaine hauteur dans la tour. À partir de cette arrivée, l'eau tombe par gravitation au fond de la tour sous forme de gouttelettes. [19]

Étant donné leur faible hauteur qui ne permet pas de profiter d'un tirage naturel significatif, ces tours sont généralement dotées de ventilateurs assurant une circulation forcée de l'air de refroidissement. On distingue deux disposition pour ces ventilateurs :

- les ventilateurs au sommet de la tour. Il s'agit d'un système efficace mais le mécanisme fonctionnant dans l'humidité, sa fiabilité est souvent problématique ;
- les ventilateur latéraux, qui poussent l'air sous l'eau. Ce système permet de sortir le ventilateur du flux d'air humide, mais il présente l'inconvénient de nécessiter une cellule plus haute, ce qui
- augmente son coût de construction. [14]

#### 4) L'instrumentation de commande :

La conception générale du contrôle-commande et de ses équipements répond à des spécifications imposées par le procédé, la sûreté nucléaire et par les conditions d'exploitation. Il est composé de :

**4.1 Capteurs :** qui effectuent automatiquement des mesures - puissance, pression (figure 28) , température (figure 27), niveau de remplissage, ....) et transforment les données physiques en signaux électriques,



Figure 27 capteur de température [20]



Figure 28 capteur de pression [20]

#### 4.2 automates de commande programmables

Une Automate (figure 29) qui traitent ces signaux, et pilotent des actionneurs. Ces systèmes élaborent, sur la base d'un certain nombre de données d'entrée, des ordres automatiques pour que les paramètres du procédé demeurent dans les limites autorisées par la sûreté, ou pour le déclenchement d'actions de protection telles que l'arrêt d'urgence du réacteur, moyens de contrôle et de pilotage qui sont à la disposition des opérateurs en salle de commande (pupitres de commande, alarmes...) C'est dans ce local que sont centralisées les informations utiles à la conduite des installations et les moyens de commande à distance des différents organes.



Figure 29 Automate de Allen-Bradley installé dans une armoire [19]

## 5) Architecture du contrôle-commande :

### **une structure à plusieurs niveaux**

Au sein du contrôle-commande, chaque système est caractérisé par son type de fonction et son rôle vis-à-vis de la sûreté ou des conditions d'exploitation et sont classés selon plusieurs niveaux pour tenir compte de leurs rôles variés, ainsi qu'à informer les opérateurs en salle des machines.

**Niveau 0** : l'interface avec le procédé : concerne les capteurs et les appareillages de protection et de coupure. Ils recueillent des données destinées à alimenter les systèmes de pilotage, de surveillance et de protection du réacteur.

**Niveau 1** : le niveau des « automates programmables ». Ils englobent les systèmes de :  
protection du réacteur et du turbo-alternateur, pilotage, surveillance et limitation du réacteur,  
automates de sûreté et de pilotage de la centrale.

**Niveau 2** : le niveau de la supervision et de pilotage de la centrale :

l'ensemble constituant l'interface homme-machine, les stations de travail et pupitres de la salle de commande, le panneau de repli, le local technique de crise, ...

les systèmes qui assurent le lien entre cette interface et les automates programmables de niveau 1.[15]

## Conclusion

---

Le nucléaire a beaucoup d'avantages, mais ils ne sont pas assez mis en avant. Par contre, les inconvénients, tels les déchets radioactifs, sont très médiatisés. La population se retrouve submergée par un flot d'informations contradictoires et sa confiance s'atténue.

L'instrumentation nucléaire est utilisée et développée dans les différents domaines comme la recherche en physique, biologie ou encore géologie ainsi que les centrales nucléaires d'électricité.

Dans le tissu industriel, le secteur des centrales nucléaires sont des importants utilisateurs de cette technologie tout au long du cycle, depuis la fabrication de combustible, la production d'électricité dans les centrales, les procédés de retraitement et la gestion des déchets nucléaires ainsi que des matières recyclées.

On rencontre une instrumentation nucléaire spécifique dans les centrales nucléaires pour la fabrication, contrôle de procédés, la caractérisation de matériaux, ou encore le domaine de la sécurité et de maintenance.

## Bibliographie

---

- [1] Science et Vie hors-série, Enquête, ce que va devenir le parc actuel.
- [2] James M. Cork, Radioactivité & physique nucléaire
- [3] D. Hubert, Risque de cancer à proximité d'installations nucléaires : études épidémiologiques, Radioprotection, Vol. 37, n° 4, p. 457
- [4] G. Niquet, C. Mouchet et C. Saut, Les centres nucléaires et le public : communication, information, Radioprotection, Vol. 39, n° 4, p. 475
- [5] Jaime Semprun, La Nucléarisation du monde, Éd. Gérard Lebovici, 1986
- [6] Arnaud Michon, Le Sens du vent : Notes sur la nucléarisation de la France au temps des illusions renouvelables, éditions de l'Encyclopédie des Nuisances, 2010 (ISBN 2910386368)
- [7] Claude Dubout, Je suis décontamineur dans le nucléaire, éditions Paulo-Ramand.
- [8] Florence D, Hartmann P (2002). Les rejets radioactifs des centrales nucléaires et leur impact  
Fournier-
- [10] Luc Valentin, Le monde subatomique
- [11] Luc Valentin, Noyaux et particules - Modèles et symétries, Hermann, 1997.
- [12] David Halliday, Introduction à la physique nucléaire, Dunod, 1957.
- [13] P. Ring & P. Schuck, The nuclear many-body problem, Springer Verlag, 1980
- . **Sites internet**
- [14] [www.astronomia.fr](http://www.astronomia.fr)
- [15] [www.areva.com](http://www.areva.com)
- [16] [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)
- [17] [www.fujielectric.fr](http://www.fujielectric.fr)
- [18] [www.EDF.FR](http://www.EDF.FR)
- [19] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- [20] [www.sfen.org](http://www.sfen.org)
- [21] [www.cea.fr](http://www.cea.fr)

# liste des figures

Figure 5 Energie de liaison par nucléon.....	11
Figure 2 sorte d'entonnoir .....	12
Figure 3 les différents genres de radiation ionisante .....	13
Figure 6 désintégration $\beta$ .....	16
Figure 5 chash flow durant la vie d'une centrale nucléaire.....	28
Figure 6 Centrales nucléaires dans le monde .....	29
Figure 7 Âge des réacteurs nucléaires dans le monde en 2013 .....	30
Figure 8 Fût de déchet abandonné au fond de la mer. ....	34
Figure 9 une centrale nucléaire .....	35
Figure 10 shema d'une centrale nucléaire .....	36
Figure 11 visualisation 3D de boucle primaire .....	37
Figure 12 cuve du réacteur .....	38
Figure 7 les équipements internes de la cuve .....	39
Figure 8 le couvercle de la cuve .....	40
Figure 15 barre de contrôle .....	40
Figure 16 Les générateurs de vapeur .....	41
Figure 17 Les tuyauteries primaires .....	42
Figure 18 shema d'une pompe primaire .....	42
Figure 19 shema d'une pompe primaire .....	43
Figure 20 le pressuriseur .....	43
Figure 21 turbine a vapeur .....	44
Figure 22 Schéma d'un turbin a vapeur .....	44
Figure 23 shema alternateur .....	45
Figure 24 alternateur dans un centrale nucléaire .....	45
Figure 9 condenseur .....	46
Figure 26 Cellule métallique .....	47
Figure 27 capteur de température .....	48
Figure 28 capteur de pression .....	48
Figure 29 Automate de Allen-Bradley installé dans une armoire.....	48

## liste des Tableaux

---

Tbleau 1 Type des radioactivité .....	15
Tableau 2 tableau périodique des éléments .....	16
Tableau 3 le nombre de centrales .....	29