

Production d'Énergie – Énergie Nucléaire

Contexte

La production et l'approvisionnement en énergie sont devenus des enjeux majeurs pour l'Humanité en ce début de 21^{ème} siècle. La dégradation de l'environnement, les difficultés dans le développement de technologies « renouvelables », la pression démographique, la surconsommation d'énergie par une partie de l'Humanité rendent encore plus complexe les nombreux challenges qui se dressent devant nous. Dans ce thème, nous aborderons la production d'énergie nucléaire et l'approvisionnement à partir des structures fondamentales de la matière que sont les atomes.

Chimie vs Physique

Produire de l'énergie à partir de la matière (voir dias)

A partir des **réactions chimiques**, nous avons vu qu'il était possible de produire de l'énergie thermique (réaction exothermique). Cette libération d'énergie éventuelle provient du réarrangement des atomes durant la réaction chimique. Durant ce processus, nous avons vu que la matière respecte le principe de Lavoisier (« Rien ne se perd, tout se transforme »). La matière ne peut apparaître ou disparaître. La réaction exothermique la plus connue est **la combustion**.

En mettant en présence, un produit combustible fossile et l'oxygène et en initiant la réaction par un apport élémentaire d'énergie (un arc électrique, une flamme d'appoint...), il est possible de récupérer **quelques centaines de kilojoules par mole de combustible**, soit finalement **quelques dizaines d'eV** (voir cours sur les ondes) par liaisons chimiques rompues.

L'étude fondamentale de la matière, de la composition des atomes a permis aux physiciens de comprendre des phénomènes dans lesquels les forces mises en jeu et les phénomènes énergétiques sont beaucoup plus considérables. Dans ces processus, **des atomes peuvent être « transformés » en d'autres** (transmutation) en faisant intervenir des quantités d'énergie considérables. Lavoisier et la Chimie n'ont plus droit au chapitre ici, ces phénomènes atomiques violents sont étudiés par la **Physique Nucléaire**.

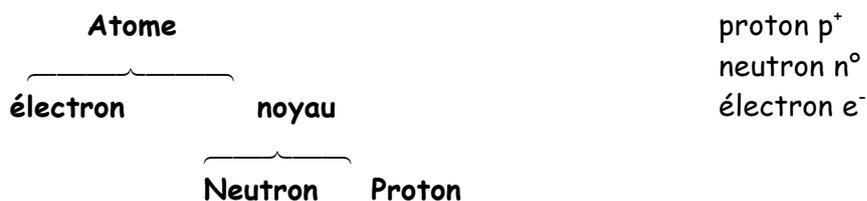
Chimie	Physique
<ul style="list-style-type: none"> • De grandes quantités de matière (moles, kilogrammes, tonnes...) • Pas de transformations des atomes, Principe de Le Chatelier. • Quelques milliers de kJ/mol de combustibles. L'énergie libérée se trouve en fait dans les liaisons chimiques entre les atomes des molécules. Quelques dizaines d'eV • Gaz à effet de serre produits. • Dépendance énergétique importante. 	<ul style="list-style-type: none"> • De « petites » quantités de matière utilisées. • Disparition d'une partie de la matière, transmutation de certains atomes. • Phénomènes énergétiques pouvant être très violents. Quelques milliers de MeV ou GeV. • PAS de gaz à effet de serre. Déchets nucléaires produits et gestion sécuritaire des sites. • Dépendance énergétique plus faible.

Rappels – Structure de l'atome

Structure électronique et nucléaire, particules élémentaires

L'atome est composé d'un noyau autour duquel tournent des électrons.

Le noyau est composé de neutron et de proton, qui sont des nucléons.



Masse des particules élémentaires

$$m_p \approx m_n \approx 1830 m_e$$
$$m_p \approx m_n \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$
$$m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

La masse des particules élémentaires au repos est :

$$m_p = 1,6726432 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$
$$m_n = 1,6748882 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Charge des particules élémentaires

$$q_p = -q_{e^-} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Notation des nucléides

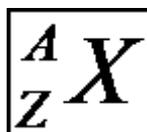
On note **Z** le nombre de protons

On note **A** le nombre de nucléons

On note **N** le nombre de neutrons

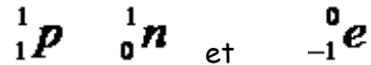
Z est aussi le nombre de charge

A est le nombre de masse



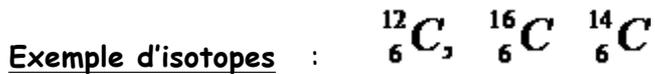
X est le symbole du **nucléide**.

On notera dès lors le proton le neutron et l'électron de la même manière :



Deux atomes ayant le même Z mais un A différent sont des **isotopes**

- Les propriétés chimiques de réactivité sont identiques ;
- Les propriétés physiques peuvent être différentes selon la stabilité relative des isotopes (fission et radioactivité)



En physique nucléaire le symbole ne représente qu'un seul atome et non une mole d'atome.

Exercices élémentaires:

Un atome de potassium (K) possède 19 électrons et 20 neutrons.

- 1) Donner son numéro atomique ou nombre de charge Z.
- 2) Combien de nucléons comporte cet atome ? En déduire son nombre de masse A.
- 3) Donner le symbole du nucléide correspondant.
- 4) Donner la composition du noyau de l'ion potassium K^+ correspondant au nucléide précédent
- 5) Des nucléides présentés ci-dessous, identifier les isotopes :



Dans la nature, on retrouve de manière constante les mêmes rapports en pourcentages pour un type d'élément donné. Ainsi par exemple, il existe trois isotopes pour l'uranium dont les pourcentages sont bien déterminés.

Uranium	${}_{92}^{234}\text{U}$	0,005 %
	${}_{92}^{235}\text{U}$	0,720 %
	${}_{92}^{238}\text{U}$	99,275%

Il est impossible de retrouver naturellement sauf conditions très particulières, des pourcentages isotopiques différents. Ces pourcentages dépendent entre autre de la stabilité relative dans le temps de ces différents atomes. Ces pourcentages peuvent aussi présenter des problèmes technologiques pour les physiciens.

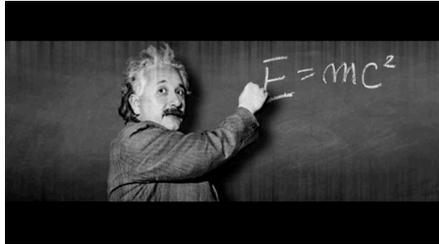
La nucléosynthèse (fabrication) des atomes a suivi le Big Bang de très près. Depuis les isotopes radioactifs les moins stables ont disparu de l'Univers et les plus stables sont encore présents autour de nous et nous en sommes composés aussi. Le seul endroit où la nucléosynthèse a encore lieu, c'est au cœur des étoiles pour des éléments relativement légers. L'élément le plus lourd encore fabriqué dans des supernovae (étoiles massives et explosives) est le Fer. Au-delà plus de nucléosynthèse dans l'Univers. Voilà pourquoi les pourcentages isotopiques sont connus constants quelque soit l'endroit où nous trouvons ces isotopes puisqu'ils sont « nés » au même moment.

On distingue :

- **Nucléosynthèse primordiale** : formation des atomes à l'origine de l'Univers lors de son refroidissement ;
- **Nucléosynthèse stellaire** : formation d'atomes « légers » jusqu'au Fer lors d'explosion violente d'étoiles.

Principe fondamental – Matière et Energie

Équivalence masse énergie



C'est difficile à imaginer mais cela fait maintenant un siècle que les physiciens **représentent la masse comme étant de l'énergie**. Depuis les travaux d'Einstein sur la relativité restreinte (1905), il est de notoriété scientifique que la matière est aussi une énergie de masse. Plus « simplement », il est possible de transformer de la matière en énergie et peut-être plus difficilement de l'énergie en matière.

La matière est avant tout un « concentré » d'énergie considérable.

D'après la relation d'Einstein, à toute masse m_0 (masse au repos), il lui correspond une énergie comme étant le produit de cette masse par la vitesse de la lumière au carré :

$$E = m_0 c^2 \quad \text{avec } c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1} \quad (1)$$

Il en résulte qu'une particule au repos possède une énergie, son énergie de masse au repos, c étant la vitesse de la lumière.

exemple : calcule de la masse du deutérium à partir de la masse du proton et du neutron. La masse d'un noyau de deutérium est : $m_D = 3,3445172.10^{-27} \text{ kg}$

Le noyau de deutérium, un isotope de l'hydrogène est ${}^2_1\text{H} = \text{D}$, il est composé d'un proton et d'un neutron. La masse des particules prises séparément est supérieure à la masse du deutérium après nucléosynthèse par fusion des particules. Le déficit de masse (défaut de masse) a été converti en énergie en respectant la relation évoquée ci-dessus. (1)

$$m_p + m_n = 3,3475314 \cdot 10^{-27} \text{ kg} > m_D = 3,3445172 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m = - 0,0030142 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{Avec (1) } \Delta E = - 2,71278 \cdot 10^{-11} \text{ J} \quad \text{pour un seul atome}$$

$$\Delta E = -1,6330935 \cdot 10^{13} \text{ J} \quad \text{pour 2g de deutérium}$$

C'est énorme. Evidemment rare sont les processus de physique nucléaire connus qui font disparaître deux grammes de matières directement.

Grandeurs liées à l'atome

Les dimensions

Le diamètre d'un atome est de l'ordre de grandeur de l'angström (Å) (10^{-10} m)

Le Rayon de Bohr de l'atome d'hydrogène est $r_H = 0,59 \text{ Å}$

Le rayon du proton est de l'ordre du femtomètre (10^{-15} m)

Le rayon d'un noyau lourd est de environ 7 fm

Le rayon du noyau de l'atome varie en fonction du nombre de nucléon A :

$$R = R_0 \cdot A^{1/3} \quad \text{avec } R_0 = 1,2 \text{ fm (relation empirique)}$$

Le temps

L'échelle de temps des phénomènes nucléaires est très étendu. Elle varie de 10^{-20} s réaction nucléaire à 10^9 ans pour la désintégration nucléaire et 10^{30} ans pour le temps de vie estimé d'un proton.

Dans la pratique on utilise l'unité la mieux adaptée au phénomène.

L'Énergie

L'unité d'énergie en physique nucléaire est l'électron-volt (eV). (voir cours sur les ondes)

1 eV = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J. Cette conversion en eV est nécessaire pour de petites quantités de matière et d'énergie. Souvenez-vous de l'énergie transportée par les ondes qui s'exprimait d'ailleurs dans cette unité.

La Masse

L'unité légale de masse est le **kg**. Beaucoup trop grand pour les atomes :
($m_p \approx m_n \approx 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg)

On va donc utiliser des unités mieux adaptées :

- **L'unité de masse atomique (uma)**

1 u est le 1/12 de la masse d'un atome de carbone 12 (^{12}C)
or une mole de carbone 12 a une masse de 12 g
donc :

$$1\text{uma} = \frac{m^{12}\text{C}}{12} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

- en **MeV** car chaque masse m_0 peut être associée une énergie : **l'énergie de masse** (souvent le physicien exprime la masse en eV)

$$E = m_0 \cdot c^2 \quad \text{avec} \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad E \text{ en joules } m \text{ en kg}$$

si E en MeV

$$1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \quad 1 \text{ J} = 0,625 \cdot 10^{13} \text{ MeV}$$

Pour déterminer la masse en MeV, on calcule l'énergie de la masse m_0 en MeV :

exemple : masse du proton au repos $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot \text{kg}$

$$E = 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ J}$$

$$E = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{1,6 \cdot 10^{-13}} \text{ MeV} = 939,375 \text{ MeV}$$

$$E = m_p \cdot c^2$$

$$m_p = 939,375 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$$

Valeurs des masses des particules élémentaires

Masse en	uma	MeV
e^-	$5,485 \cdot 10^{-4}$	0,511
p^+	1,00727	938,28
n^0	1,00866	939,57
uma	1	931,5
α	4,00150	3727,41

Donc on pourrait traduire la masse réelle en kilogramme d'un proton, d'un neutron ou d'un électron en eV ou en MeV (vu les niveaux d'énergie) avec la loi $E=mc^2$. C'est une manière un peu particulière de représenter la masse mais elle est classique chez le physicien nucléaire.

Par exemple, les physiciens du CERN à Genève qui ont découvert récemment le Boson de Higgs très important pour le modèle standard de l'Univers le quantifie en représentant sa masse en GeV soit environ 126 GeV d'énergie de masse.

Principes de conservation

Vous connaissez en chimie le principe de Lavoisier. Un atome de carbone reste un atome de carbone après réaction chimique et les quantités d'énergie échangées (exothermique et endothermique) sont faibles. C'est pour cela d'ailleurs que vous pondérez les équations chimiques.

Vous avez vu également le principe de conservation de l'énergie. Différentes formes d'énergie se convertissent entre elles (énergie cinétique en potentielle par exemple). Certains réservoirs d'énergies différentes communiquent, c'est le premier principe de la thermodynamique.

DONC on ne crée pas de matière et on ne crée pas d'énergie à partir de rien. De même qu'en faire disparaître.

DE PLUS, nous venons de voir qu'il y a une conversion possible de matière en énergie et inversement dans la relation d'Einstein.

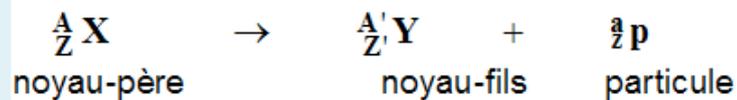
- **la loi de conservation de la charge électrique** : elle impose que la somme des nombres de charge soit la même avant et après une réaction.
- **la loi de conservation du nombre de nucléons** : elle impose que la somme des nombres de masse soit la même avant et après une réaction.
- Nous utiliserons donc aussi dans ce thème **la loi de conservation de l'énergie** : elle impose que l'énergie totale à l'issue d'une réaction nucléaire soit égale à l'énergie totale avant cette réaction.

Or, l'énergie de masse contenue dans les noyaux à l'issue d'une réaction est généralement inférieure à l'énergie de masse contenue dans les noyaux avant la réaction. La loi de conservation de l'énergie permet d'affirmer qu'il y a à la fin de la réaction, de l'énergie autre que l'énergie de masse des noyaux. Cette énergie peut être de l'énergie cinétique emportée par les noyaux et les particules émises

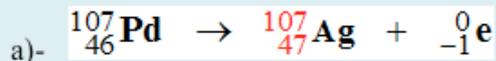
(c'est-à-dire de l'énergie que possèdent noyaux et particules du fait de leur vitesse), mais ce peut être aussi de l'énergie emportée par des ondes électromagnétiques très énergétiques : le rayonnement γ (gamma). (souvenez-vous)

Généralisation des conservations

- Toutes les réactions nucléaires vérifient les lois de conservation suivantes :



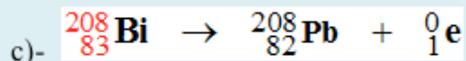
- Lois de Soddy :
- Conservation du nombre de masse : $A = A' + a$
- Conservation de la charge : $Z = Z' + z$



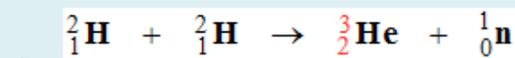
- $107 = A$ et $46 = Z + (-1)$
- $A = 107$ et $Z = 47$



- $218 = A + 4$ et $84 = Z + 2$
- $A = 214$ et $Z = 82$



- $A = 208 + 0$ et $Z = 82 + 1$
- $A = 208$ et $Z = 83$



- $2 + 2 = A + 1$ et $1 + 1 = Z + 0$
- $A = 3$ et $Z = 2$

La stabilité des atomes

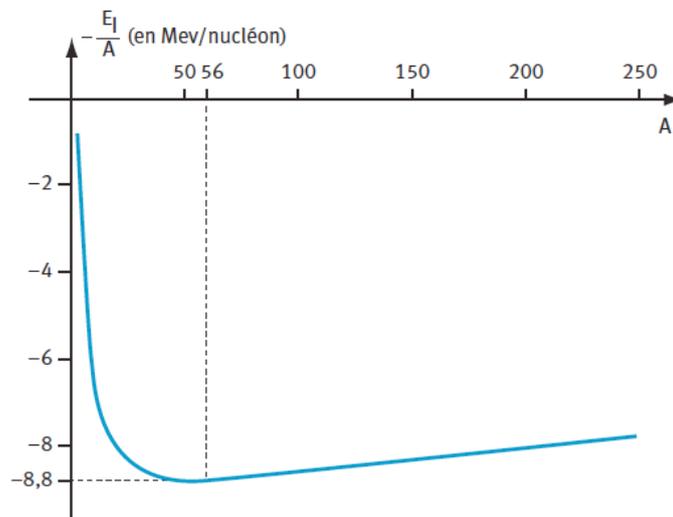
Une toute grande partie des atomes est stable, très stable dans la durée. Heureusement, nous ne serions pas là pour en parler. Certains d'entre eux, par contre, peuvent présenter une instabilité plus ou moins importante. Plus le pourcentage d'existence est faible, plus l'isotope peut être considéré comme instable.

Comment les repérer ?

La stabilité va dépendre essentiellement de **deux** paramètres complémentaires :

- Le rapport $\frac{Z-A}{A}$; dans les éléments chimiques ou le nombre de n° devient prépondérant par rapport au nombre de protons, l'instabilité apparaît. Donc si ce rapport s'écarte de 1, l'instabilité des isotopes est croissante.
- L'instabilité va dépendre de l'importance des forces nucléaires des particules qui composent le noyau ; On définit le rapport EI/A où EI (énergie de liaison) représente l'ensemble des forces de liaisons nucléaires et A le nombre de masse ;

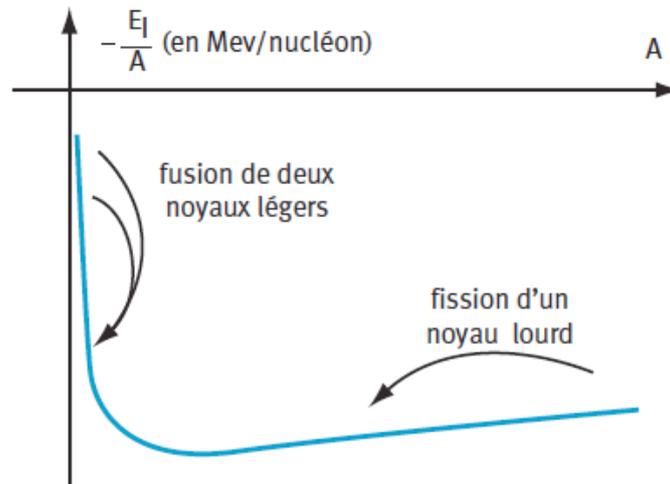
L'importance de ce rapport EI/A est mise en évidence dans la courbe d'Aston. L'énergie de liaisons des particules est maximale entre $A= 30$ et $A=90$. Pour ces éléments, la stabilité est donc la plus importante



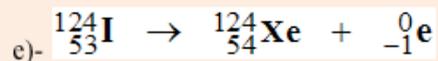
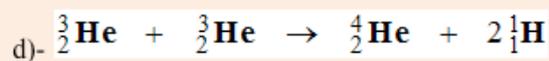
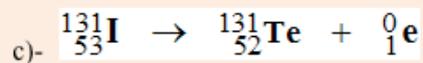
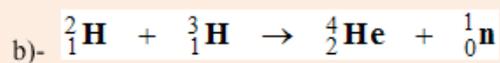
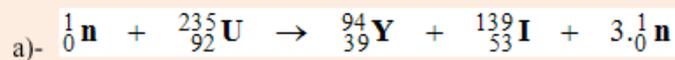
Si $A > 30$, EI/A varie peu et est voisine de $- 8$ MeV/nucléon. C'est une valeur forte comparée à l'énergie de liaison des électrons. On peut obtenir de 2 façons des noyaux de grande énergie de liaison par nucléon. Au centre dans des nombres de masse moyen, c'est l'énergie de liaison qui

règne en maître et ces atomes sont stables d'un point de vue nucléaire (ni fusion, ni fission possible)

- Soit en cassant un **noyau lourd en deux noyaux plus légers** : c'est la **FISSION**.
- Soit en assemblant **deux noyaux légers en un noyau plus lourd** : c'est la **FUSION**



Parmi les réactions nucléaires suivantes, repérer les équations des réactions de fission et de fusion :



Applications de la fusion et de la fission

La fission nucléaire non contrôlée

Tout avait pourtant commencé avec Hiroshima et Nagasaki en 1945 car les deux premières fissions non contrôlées se sont produites en larguant les deux premières bombes A (à fission d'uranium et de plutonium) sur le Japon ouvrant l'ère du nucléaire et de la dissuasion géopolitique de la guerre froide.

La fission nucléaire contrôlée

C'est elle que nous étudierons dans la suite puisque depuis la fin des années 40, l'homme utilise la fission nucléaire contrôlée pour produire de l'électricité dans les centrales nucléaires.

La fusion nucléaire non contrôlée

Les hommes ont développé dans les années 50, la bombe à hydrogène, bombe H ou bombe thermonucléaire bien plus puissance que la bombe atomique classique, bombe A ou à fission. Le but est de dégager toute l'énergie d'un mini-soleil sur terre pour des destructions massives.

La fusion nucléaire contrôlée

C'est le Saint Graal dans la recherche fondamentale de la physique nucléaire en matière de production d'énergie d'aujourd'hui. Faire de l'énergie bon marché sans limite à partir de la fusion est un objectif poursuivi par les physiciens.

ITER est un projet qui devrait permettre à l'homme de maîtriser la fusion nucléaire à l'horizon de 2025-2030 pour un investissement de l'ordre de 20 milliards d'euros pour un consortium international public et privé. Le projet ITER s'installe progressivement dans le sud de la France à Cadarache. L'objectif étant de maîtriser le processus qui a lieu au cœur d'une étoile, à petite échelle en produisant de l'électricité thermique en déclenchant la fusion de l'Hydrogène en Hélium comme dans le soleil.

Les contraintes techniques sont énormes. Les physiciens savent que le processus est prometteur. Un autre projet plus petit, le JET installé en Grande Bretagne a permis de produire de l'électricité avec un début de fusion. Il faudra maintenir une température de 15 millions de Kelvin dans de la matière confinée de manière électromagnétique pendant quelques dixièmes de seconde afin d'initier une fusion contrôlée. Une centrale nucléaire à fission classique servirait « d'allumette »

De nombreuses questions se posent en matière de pertinence économique d'un tel projet. Le principal argument des sceptiques se base sur le coût et la possibilité d'investir cet argent dans des technologies renouvelables non nucléaires. Le développement de tels projets est aussi un choix délibérément politique avec l'influence de lobbies liés à l'industrie nucléaire.

L'instabilité de certains atomes se manifeste **soit par le phénomène de fission** pour les éléments lourds, **soit par fusion** (sous certaines conditions tout de même) pour les éléments légers.

Petit résumé

► La valeur, en joule, de l'énergie obtenue par transformation d'une masse m , exprimée en kg, est donnée par la formule d'Einstein : $E = m c^2$ avec $c = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$

► On appelle énergie de liaison E_l du noyau la différence : $E_l = E - E_0$ en notant $E = (Z m_p + N m_n) c^2$ l'énergie de masse des Z protons et N neutrons séparés et en notant $E_0 = m_0 c^2$ l'énergie de masse de ces nucléons assemblés pour former un noyau de masse m_0 .

Cette relation de définition de l'énergie de liaison peut aussi s'écrire sous la forme : $E_l = \Delta m c^2$, dans laquelle Δm , qui est appelé défaut de masse, représente la différence entre la masse des nucléons séparés et la masse du noyau :

$$\Delta m = Z m_p + N m_n - m_0.$$

Le défaut de masse est souvent exprimé en unité de masse atomique ($1 \text{ u} = 1,66.10^{-27} \text{ kg}$).

► En physique des particules, l'énergie est souvent exprimée en électronvolt $1 \text{ eV} = 1,60.10^{-19} \text{ J}$, ou en méga-électronvolt : $1 \text{ MeV} = 1,60.10^{-13} \text{ J}$.

► Connaissant l'énergie de liaison E_l d'un noyau du nucléide ${}^A_Z X$ qui possède A nucléons, on obtient l'énergie de liaison par nucléon en calculant le quotient $\frac{E_l}{A}$ qui s'exprime en MeV/nucléon.

► On appelle loi de conservation une loi physique imposant qu'une grandeur donnée conserve la même valeur avant une transformation et à la fin de cette transformation.

Pour écrire une réaction nucléaire, on utilise la loi de conservation de la charge électrique et la loi de conservation du nombre de nucléons.

Pour calculer l'énergie libérée par la réaction, on utilise la loi de conservation de l'énergie : elle impose que l'énergie totale à l'issue d'une réaction nucléaire soit égale à l'énergie totale avant cette réaction.

► La courbe d'Aston est obtenue en portant en abscisse le nombre de nucléons de chaque noyau et en ordonnée l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon : $-\frac{E_l}{A}$. Sur cette courbe, les noyaux les plus stables se situent « au fond de la cuvette »

- ▶ Réaction de fission : un noyau très lourd se scinde en deux noyaux plus légers de tailles comparables. Ainsi, l'uranium 235 est fissile et la réaction, en produisant plusieurs neutrons, va se poursuivre : il s'agit d'une réaction en chaîne. Les noyaux obtenus par cette fission constituent les déchets radioactifs des centrales nucléaires.
- ▶ Réaction de fusion : deux noyaux très légers fusionnent pour former un noyau plus lourd.
Ces réactions sont à l'origine de l'énergie produite par les étoiles comme le Soleil, grâce à la fusion de l'hydrogène.
- ▶ Ces réactions nucléaires s'accompagnent d'une perte de masse et d'une libération d'énergie donnée par la relation suivante :
$$E = \Delta m \times c^2$$

avec Δm : perte de masse en kilogramme (kg)
 c : vitesse de propagation de la lumière dans le vide (célébrité)
 E : énergie libérée en joule (J)

La fission

Les conditions nécessaires pour la fission sont moins contraignantes que pour la fusion.

Désexcitation des noyaux d'atomes

Lorsque les atomes instables subissent la **fusion** ou la **fission** nucléaire, en tant que produits de la fission et fusion, ceux-ci sont excités (instabilité complémentaire). Ils se stabilisent de plusieurs manières :

Soit l'émission γ (la radioactivité) - rayonnement électromagnétique de fréquence élevée, de longueur d'onde faible et d'énergie de l'ordre de 2 MeV. C'est important.

Soit l'émission β^- - émission d'un flux d'électrons

Soit l'émission β^+ - émission d'un flux de positon (électron positif)

Soit l'émission de noyau léger (Hélium) - **on parlera d'émission α**

Soit par conversion interne - dans ce cas, le trop plein d'énergie est transféré aux électrons les plus proches (couche K), cette énergie provoque ainsi l'arrachement de ces électrons et l'atome retrouve ensuite sa stabilité finale en émettant des RX

Soit en proposant une réaction nucléaire qui fait tout cela à la fois

Qu'est-ce que la radioactivité ?

Comme il a été précisé juste avant, la radioactivité est une émission d'une lumière invisible très énergétique, **les rayons Gamma (voir cours sur les ondes)**.

L'émission γ est un phénomène naturel de stabilisation des produits de fission et de fusion. L'Homme dans ses développements technologiques doit malheureusement s'en accommoder. Il ne la recherche pas nécessairement.

Certains nucléides se transforment spontanément au cours du temps. Cette transformation correspond à un changement de nature du noyau. Cette transformation se fait par émission de particule α ou β ou par fission spontanée. Cela se passe pour les noyaux lourds ou qui ont un excès de neutrons.

Ces noyaux sont dits « Radioactifs » ils se désintègrent. Ce phénomène est indépendant des conditions physico-chimiques du nucléide et de l'âge du nucléide.

La probabilité que, pendant un temps Δt , le nucléide considéré se désintègre est une donnée caractéristique de ce nucléide.

La loi de désintégration (fission)

Plus un élément est instable, plus il se désintégrera en éléments légers rapidement en libérant de plus grande quantités de γ selon une loi exponentielle

$$N_{(t)} = N_0 e^{-\lambda t}$$

$N(t)$ est la quantité d'isotopes radioactifs restant à un l'instant t

N_0 = quantité d'isotopes de départ

λ = constante de désintégration de l'élément chimique concerné ;

Le temps de demi-vie d'un isotope

Ce temps représente la durée nécessaire afin de voir disparaître la moitié de la quantité de départ de l'isotope concerné. $N(t) = N_0/2$

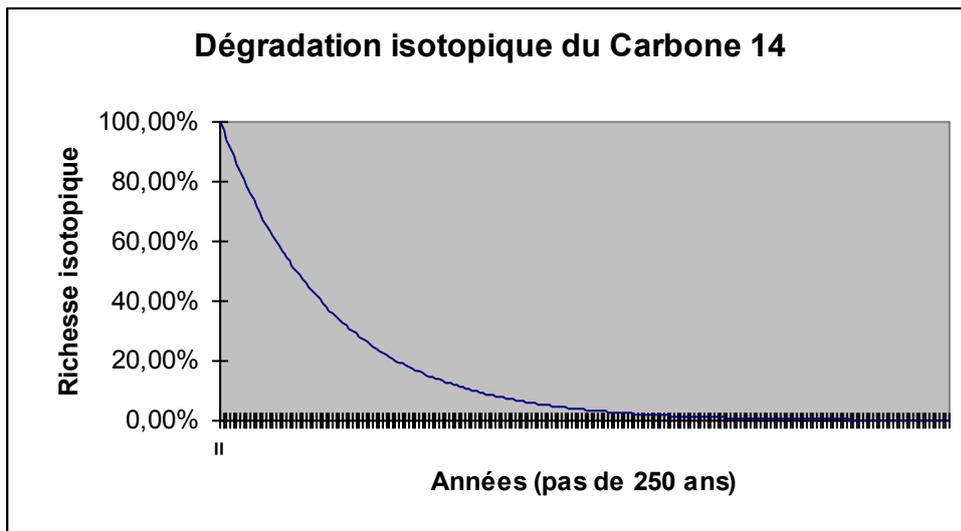
Que vaut ce $t_{1/2}$? (Développement mathématique de la loi ci-dessus ?)

Application : la datation radioactive de restes organiques ou de roches...

Exemple pour le carbone 14 (^{14}C) :

$$\lambda = 1,205 \cdot 10^{-4}$$

$t_{1/2}$?

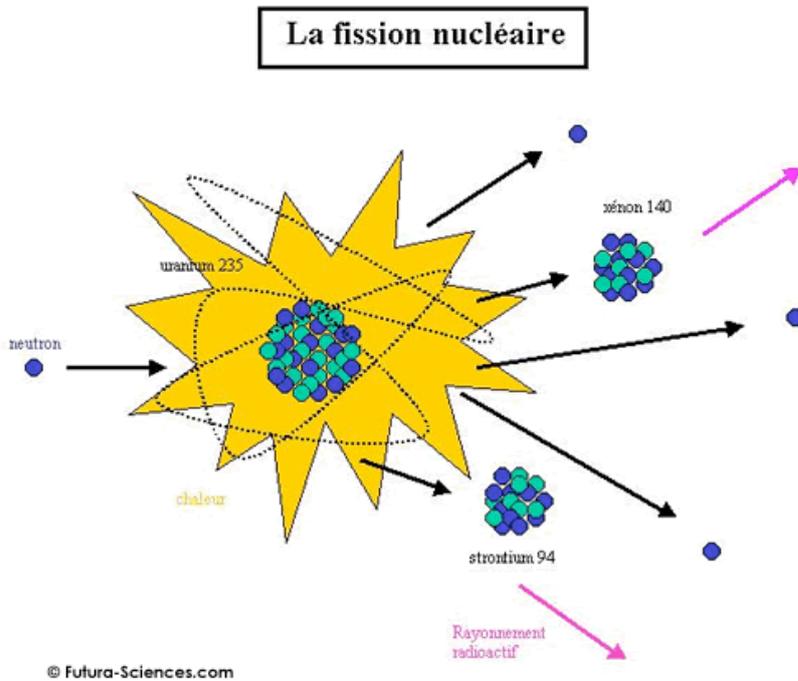


Autres exemples d'isotopes :

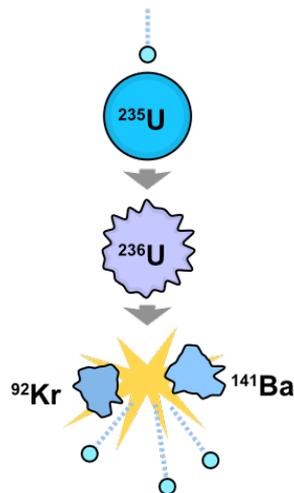
Uranium : ^{239}U : 23 minutes
 ^{235}U : $7,1 \cdot 10^8$ ans
 ^{238}U : $4,5 \cdot 10^9$ ans

Qu'est-ce que la fission nucléaire ?

La fission concerne donc les **noyaux lourds**. Ce phénomène **naturel** se voit recherché et renforcé dans les applications nucléaires **civiles** et **militaires**.

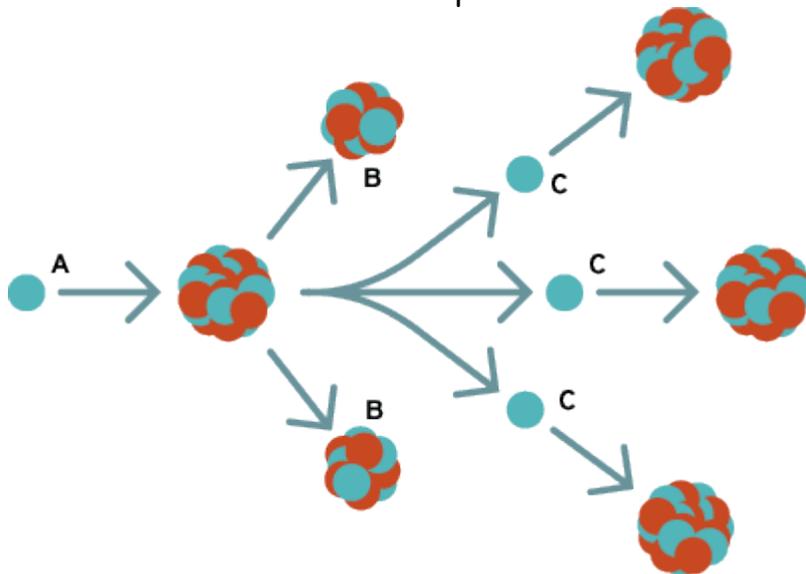


On peut aussi obtenir d'autres types de produits de fission (PF)



- A l'origine de la réaction de fission, il y a un projectile, le **neutron**, qui vient frapper un noyau et le divise en deux parties (fission).

- La division du noyau est appelée réaction de fission et un atome qui a la faculté de se diviser en deux est dit « fissile ». C'est le cas de l'Uranium 235 et du Plutonium 239.
- Cette réaction s'accompagne d'un grand dégagement d'énergie sous forme de chaleur.. Cette énergie provient dans ce cas de la disparition de certaines liaisons fortes dans le noyau entre particules puisque des neutrons (n°) sont éjectés.
- La fission est utilisée soit dans les réacteurs nucléaires où on maîtrise les réactions en chaîne pour produire de l'énergie, soit dans le domaine militaire où la réaction en chaîne est laissée en toute liberté. (Bombe atomique)
- Lors de la fission, l'atome d'Uranium est divisé en deux atomes (appelés produits de fission) et émet deux ou trois neutrons. Cette réaction s'accompagne de rayonnements alpha, bêta et gamma.
- Les neutrons émis lors de la réaction de fission sont susceptibles, à leur tour, de provoquer une réaction de fission d'un atome d'uranium. La réaction nucléaire peut ainsi se poursuivre de proche en proche. C'est ce que l'on appelle la réaction en chaîne soit contrôlée ou explosive.



Pour le physicien, le plus gros problème réside dans la nécessité de posséder dans un même échantillon suffisamment d'atomes fissiles, que ce soit en application civile mais encore plus dans le contexte des applications militaires. Cette masse minimale d'isotopes instables impérative pour initier la réaction nucléaire de fission et pour avoir une réaction en chaîne est appelée **Masse Critique**. Pour cela il faut un pourcentage suffisant d'isotopes instables sinon les chances de voir un neutron percuter un nouvel atome instable sont très faibles

et le processus de réaction en chaîne ne peut se développer. C'est une question de probabilité.

Si effectivement, nous prenons le cas de l'**Uranium**, c'est l'isotope **235** qui intéresse le physicien. Le pourcentage naturel de cet isotope est de **0,720%**. Si vous avez 1kg d'uranium pur naturel (il faut déjà l'obtenir), 7,2g représente la quantité d'isotope 235 utile à la fission. Que faut-il faire pour améliorer cette situation difficile ?

Il faut enrichir en isotope instable.

L'enrichissement de l'Uranium

Puisqu'il n'y en a pas assez (« concentration »), il faut spécifiquement enrichir les échantillons avec un rapport plus intéressant en ^{235}U .

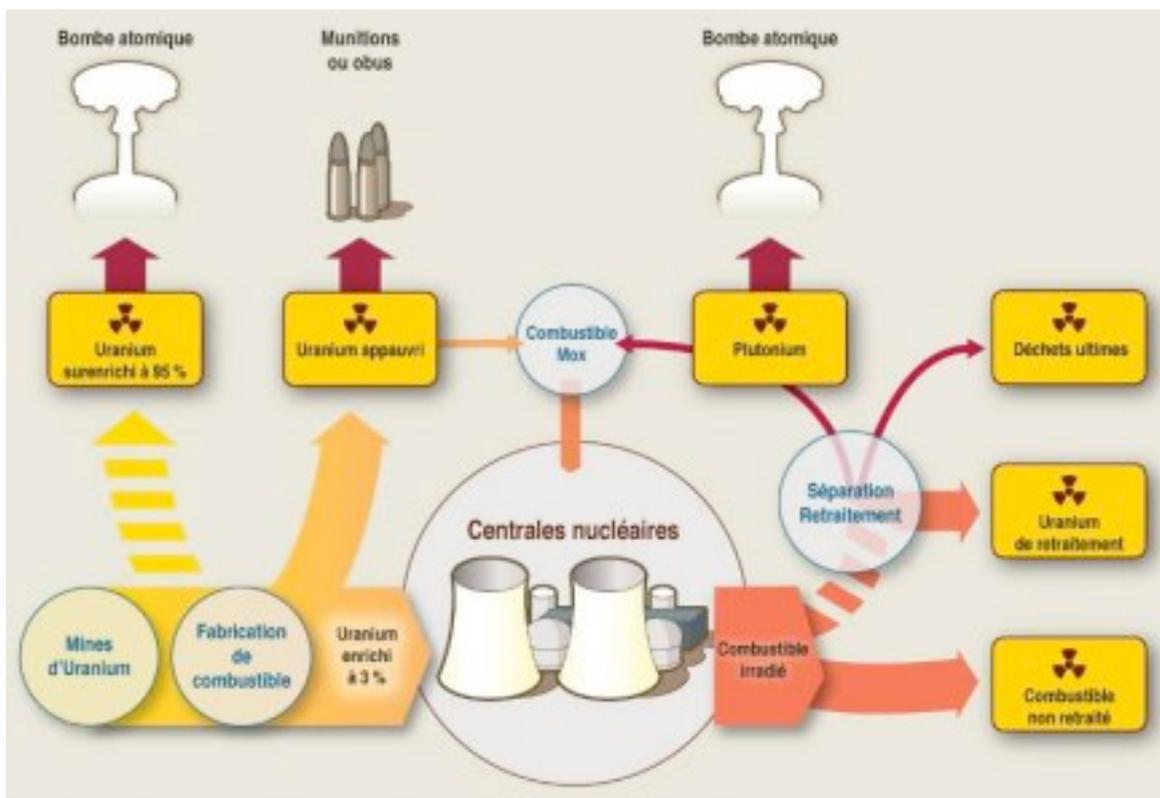
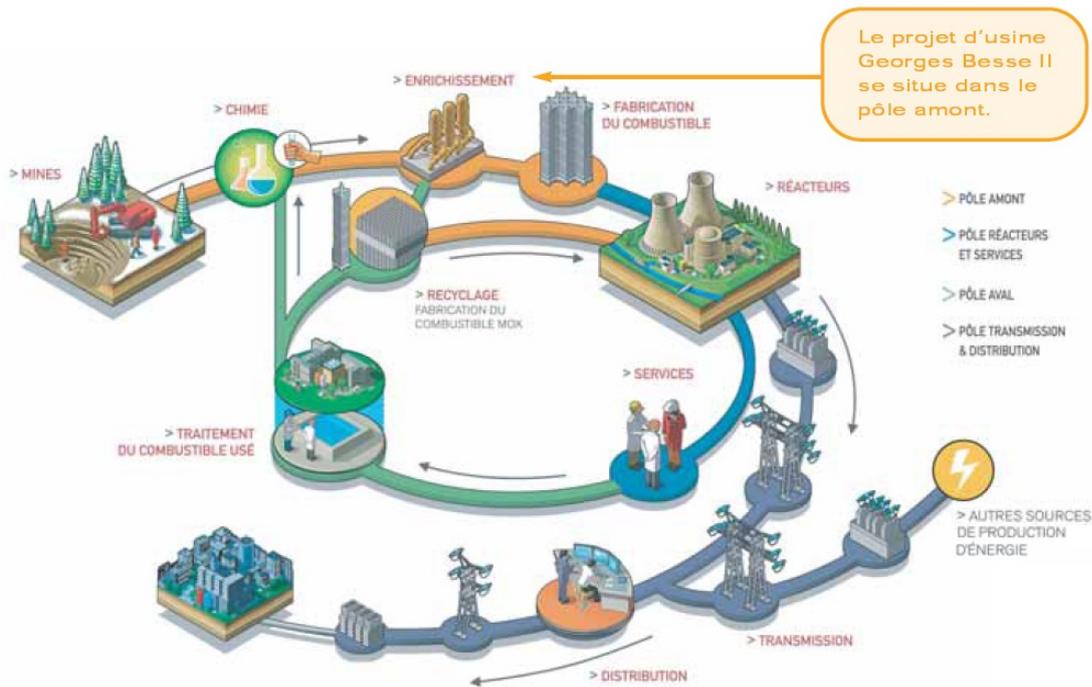
Pour les applications nucléaires civiles, les taux d'enrichissement à atteindre sont de l'ordre de 20 % maximum. Pour le nucléaire militaire (bombes), il faut dépasser 90%. Donc une centrale nucléaire ne peut pas se transformer en bombe A !!

Plus l'enrichissement est élevé plus cela va coûter cher en ressources technologiques, en moyens humains...

La méthode la plus utilisée est la **diffusion gazeuse**. On utilise pour cela un sel d'uranium qui est l'hexafluorure d'uranium, obtenu chimiquement à partir du **yellow cake** (UO_8) car il ressemble à de la pâte à gâteau. On le fait passer dans une série de pompes avec membrane de diffusion et le sel d' ^{235}U diffuse préférentiellement au travers de la membrane que le sel d' ^{238}U . Ceci permet de les séparer progressivement et d'enrichir la proportion d'uranium 235.

Ces technologies sont délicates car il faut installer des pompes en batterie et en série l'une derrière l'autre avec un différentiel de pression faible entre elles et parfois plus de 2000 pompes les unes derrière les autres afin d'obtenir l'enrichissement souhaité. Si une seule pompe est défaillante, tout le processus doit recommencer.

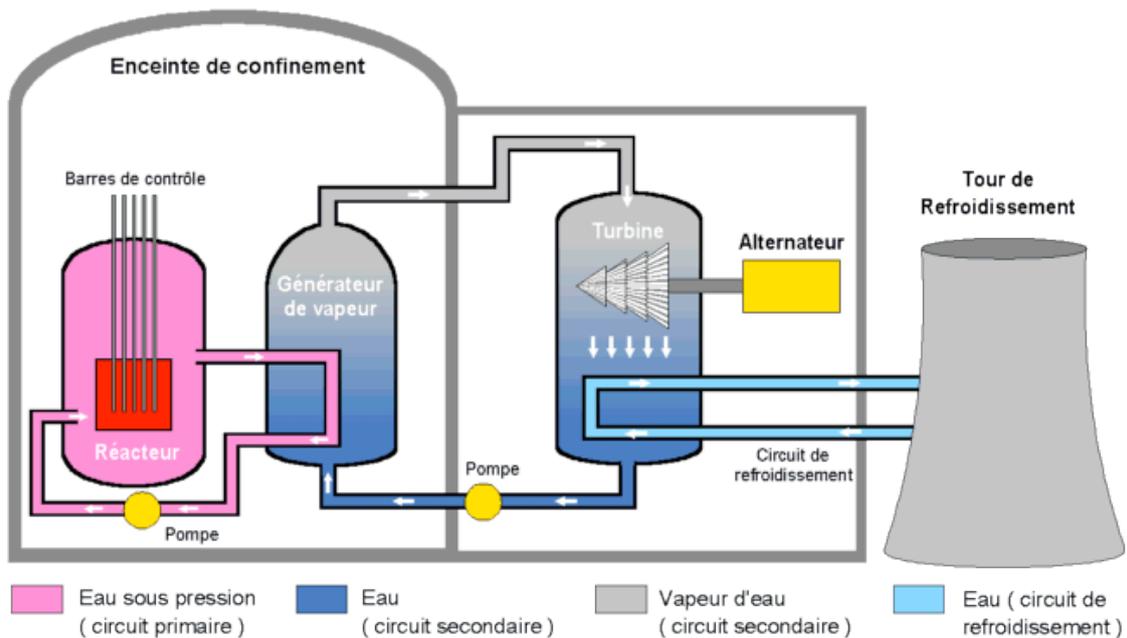
Les usines d'enrichissement sont des installations énormes souvent visibles depuis l'espace et les satellites.



Applications de la fission nucléaire civile

Fonctionnement d'une centrale nucléaire classique (PWR)

Pressurized Water Reactor est le réacteur le plus courant en Europe et aux EU



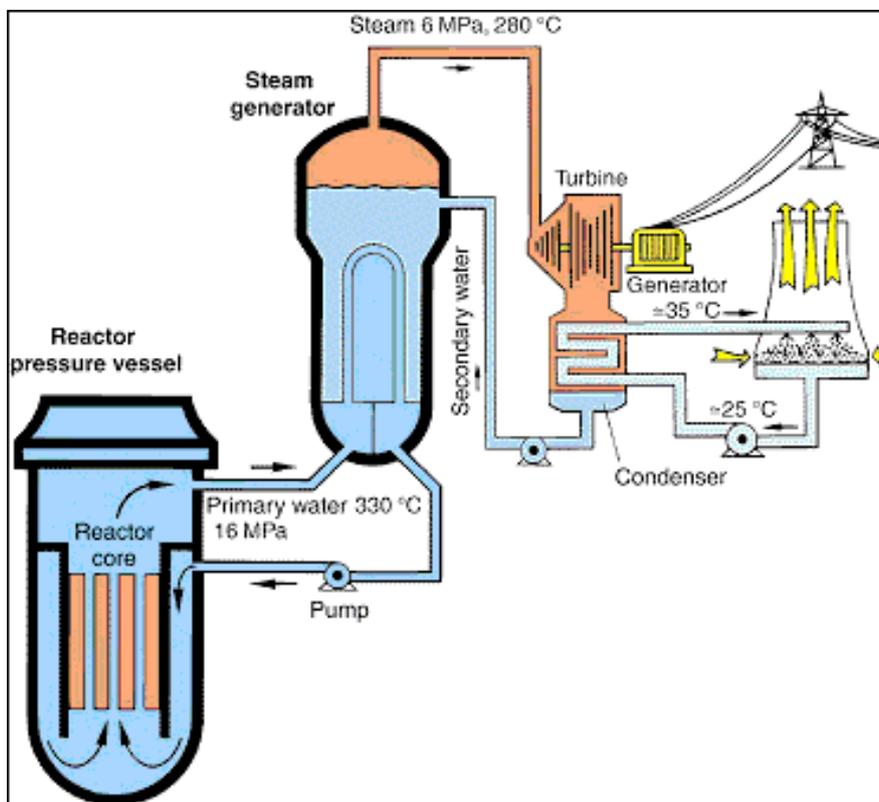
De gauche à droite, il y a finalement **trois parties** dont une seule, celle de gauche est spécifique à la centrale nucléaire.

- **L'enceinte de confinement** en béton armé contient le **circuit primaire** permettant de récupérer la chaleur émise par le processus de fission au centre du cœur du **réacteur**, comme le **circuit de refroidissement** d'un moteur de voiture. Ce circuit primaire est évidemment en circuit fermé et entre en contact avec le **circuit secondaire** dans l'**enceinte de confinement** et par un **échangeur de chaleur**, permet la **génération de vapeur**. Des barres de contrôle permettent de maîtriser les performances du réacteur, voir de l'arrêter rapidement si un incident majeur survient.
- **Le circuit secondaire** amène la vapeur générée dans la partie classique de la centrale. Classique car les **turbines et les alternateurs** permettant de **générer le courant électrique** alternatif sont des structures que l'on retrouve dans toute centrale énergétique non nucléaire (gaz, charbon, mazout...). Le circuit secondaire est aussi un **circuit fermé**. Il entre également en contact avec le **circuit tertiaire** par échangeur de chaleur afin d'assurer la

condensation de la vapeur et retourner ensuite dans l'enceinte de confinement.

- **Le circuit tertiaire** est la partie la **plus visible** (eau de refroidissement) car on aperçoit souvent ses colonnes de refroidissement de très loin. **C'est un système ouvert mais il n'a jamais été en contact direct (matière) avec le circuit secondaire et encore moins avec le circuit primaire.** C'est une véritable fabrique à nuages tout à fait inoffensive surtout aux heures de pointe quand la demande est importante. Ce circuit tertiaire peut aussi pomper de l'eau dans une rivière ou en mer et rejeter ensuite une eau ayant une température un peu plus élevée. On peut chauffer aussi quelques installations à proximité.

Conditions thermiques et physiques simplifiées d'un PWR



Incidents et Accidents

Dans les cinquante années d'exploitation du nucléaire civil (centrales), **il y a eu trois accidents sérieux dans l'exploitation des réacteurs PWR.** Ce fut celui de **Three Miles Island** aux USA en 1979. Un technicien a commis l'erreur de « fermer » un circuit de refroidissement de secours du circuit secondaire. La température a grimpé rapidement dans le circuit primaire faisant fondre une partie du combustible. Les installations auraient pu exploser (PAS une explosion nucléaire). Il a finalement fallu arroser le réacteur pour le refroidir et une partie

R.HORION – Sc3(3) 28/Sc3(4) 22/Année 2015-2016 203

des eaux contaminées fut déversée dans la rivière toute proche. **L'accident majeur de Tchernobyl - Ukraine en 1986** s'est passé dans une centrale de l'ancienne URSS et dont la technologie de fonctionnement était tout à fait différente des PWR et nettement moins sûre. La protection de la vie des civiles n'était pas une priorité pour le régime soviétique. Les conséquences sont encore nombreuses actuellement notamment sur la santé des enfants. Plusieurs dizaines d'ouvriers liquidateurs sont morts maintenant des suites de la construction du sarcophage sur le réacteur. Ils avaient reçu l'équivalent de 100 € pour service rendu à la Mère Patrie...

Fukushima, de nos jours...

L'accident de Fukushima doit définitivement « sonner la fin de la récréation ». Le nucléaire civil représente une menace qui va s'accroître pour les populations car la majeure partie des réacteurs vieillit et il serait bon de penser à sortir du nucléaire par une politique agressive en matière d'énergie renouvelable. C'est possible mais il faut relever ses manches pour y arriver et faire preuve d'ingéniosité, ce qui n'est pas toujours le propre de nos politiciens. Nous devons réaliser ce qu'on appelle la transition énergétique.

Que s'est-t-il passé au Japon ?

Les six réacteurs nucléaires de Fukushima sont installés en bordure de l'océan Pacifique. Vous savez maintenant que les centrales nucléaires sont tributaires d'une source de refroidissement externe (cours d'eau ou grands lacs ou océans). On aurait pu imaginer installer les centrales nippones au bord de fleuves et non pas en bord d'océan pour ne pas être atteint par les Tsunamis mais le pays est peu large, très vite montagneux et donc il n'y a pas de fleuves au débit régulier. L'océan était donc la seule option possible.

Le Tsunami qui a rapidement suivi le séisme du 11 mars 2011 a submergé les installations de refroidissement des réacteurs 1 à 4. Automatiquement, les barres de contrôle sont remontées dans les réacteurs pour réduire fortement la fission nucléaire et éviter une surchauffe fatale directement. Cette procédure s'est bien passée. Il faut sans doute noter que la violence du séisme avait peut-être déjà fragilisé les installations car les barres de contrôle étaient déjà remontées dans les réacteurs 5 et 6. On pense néanmoins qu'une partie des barres de contrôle ne se sont pas bien installées au cœur des réacteurs suite au violent séisme.

Il faut savoir que même à barres de contrôle abaissées, la puissance minimale d'un réacteur avoisine encore 5 à 10%, puissance suffisante pour monter en température si un minimum de refroidissement n'a pas lieu. Le système de refroidissement externe étant complètement hors service, la température au sein des réacteurs (1 et 3) a commencé à augmenter jusqu'à atteindre la température de décomposition de l'eau en oxygène et en hydrogène sur les barres de combustible Uranium.

Les ingénieurs ont dû dégazer cet oxygène et cet hydrogène dans l'enceinte de confinement pour éviter une montée en pression dans les réacteurs. Ce mélange libéré hautement explosif a malheureusement soufflé les enceintes de confinement des réacteurs.

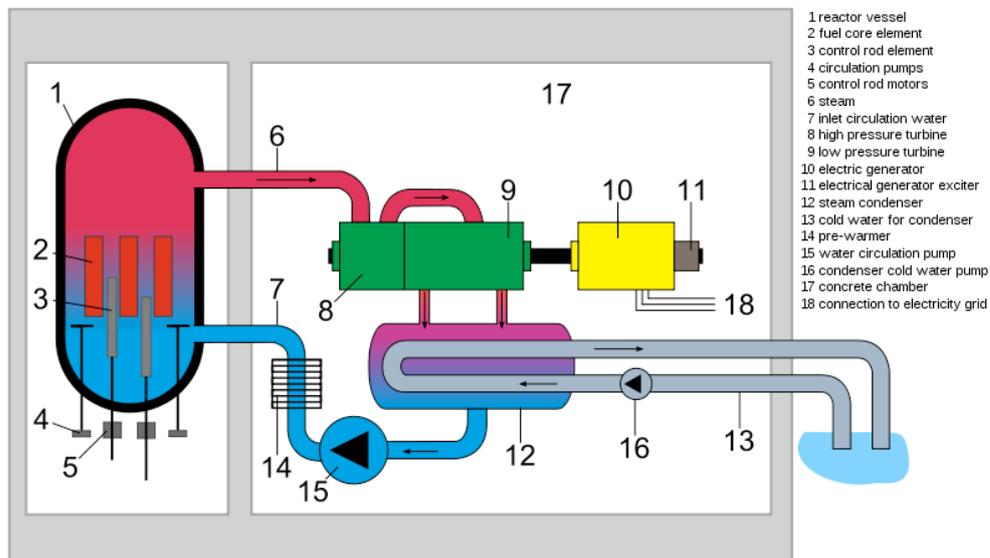
Ensuite, les réacteurs manquant d'eau ont continué à monter en température, au-delà de 1000 degrés Celsius entraînant ainsi la fonte partielle du combustible nucléaire et de l'enveloppe métallique des réacteurs. De cette manière, l'eau envoyée par les pompiers pour refroidir le combustible à contribuer aussi par entraînement à la vapeur à répandre dans l'environnement des isotopes radioactifs comme le Césium 137. A l'heure actuelle, on ne sait pas encore dire si l'enveloppe principale à la base des réacteurs a résisté à cette surchauffe. Si ce n'est pas le cas, du combustible nucléaire pourrait entrer dans le sol sous la centrale, polluer gravement la nappe phréatique et l'océan tout proche et la chaîne alimentaire pour plusieurs dizaines d'années.

D'un point de vue technique les réacteurs de Fukushima sont des BWR et non des PWR comme en Europe et aux EU. Ces *Boiling Water Reactor* (BWR) ne possèdent qu'un circuit de refroidissement externe sans échange chimique évidemment et le réacteur génère directement de la vapeur sans circuit secondaire et donc cette vapeur ici radioactive fait tourner les turbines de l'alternateur. Ces réacteurs ont un meilleur bilan thermique (rendement) mais ils sont, semble-t-il, plus sensible en matière de refroidissement.

« Aujourd'hui le Japon a décidé de sortir du nucléaire et de se tourner vers un grand plan d'énergies renouvelables... »

D'autres incidents ont eu lieu à différents endroits du monde dans la gestion des combustibles et des déchets nucléaires. Les déchets représentent effectivement un enjeu majeur et un désavantage clairement important dans l'utilisation des technologies de la fission nucléaire ne fût-ce que par la radioactivité résiduelle parfois très longue des déchets nucléaires.

Modèle de BWR (Fukushima)



Physique Nucléaire - Sciences & Sociétés - Quelques questions potentielles de réflexion.

1. Quels sont les arguments en faveur et en défaveur de l'industrie nucléaire de fission ?
2. Quels sont les arguments pour et contre un projet comme ITER ?
3. Que faut-il penser de l'argument qui prétend que l'exploitation d'une centrale nucléaire présente un bilan carbone nul ?
4. Sortir du nucléaire, pourquoi pas. Quels sont les arguments en faveur et en défaveur actuellement ?
5. Combien d'éoliennes faut-il pour remplacer la production de la centrale de Tihange ?
6. Quels sont les principaux problèmes liés à la gestion des déchets nucléaires ?
7. Quelles sont les applications de l'industrie nucléaire civile ?
8. Quelles sont les différences entre irradiation et contamination ?