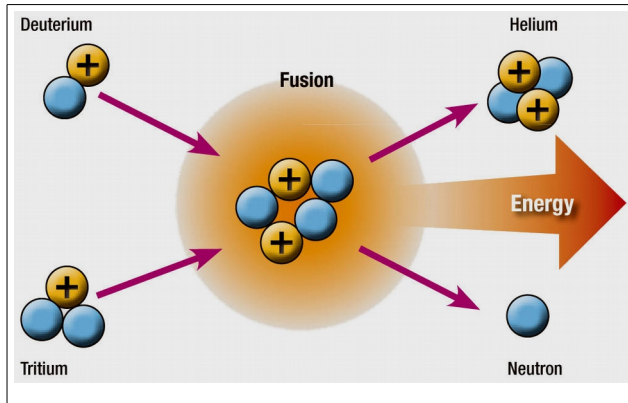


# FUSION ET FISSION NUCLÉAIRE

## 1. LA FUSION NUCLÉAIRE

### 1.1 Définition



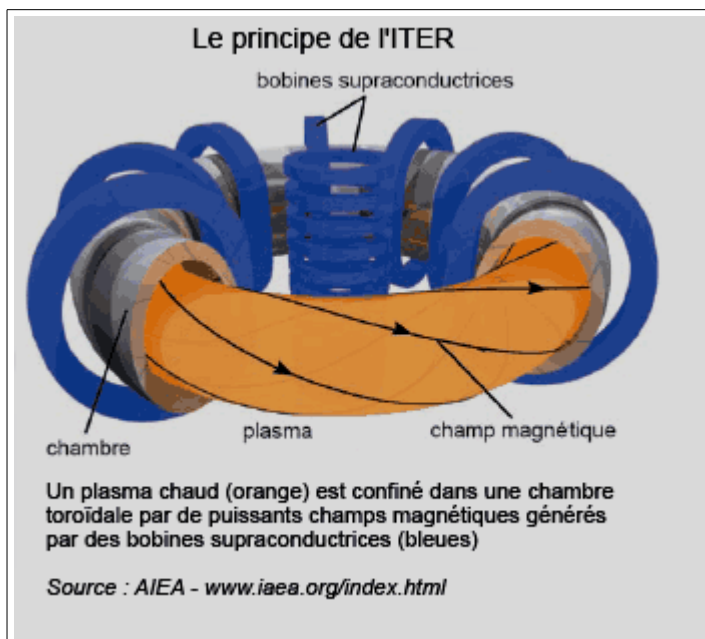
La fusion nucléaire est une transformation au cours de laquelle deux noyaux d'atomes légers, (en général l'hydrogène et ses isotopes) se combinent pour former un noyau plus lourd.

Exemple de fusion nucléaire :

le deutérium  ${}^2_1\text{H}$  et le tritium  ${}^3_1\text{H}$  se combinent pour former un noyau d'hélium plus lourd avec émission d'un neutron.

Cette réaction de fusion nucléaire libère une énergie énorme sous forme de rayons gamma et d'énergie cinétique des particules émises. Dans le Soleil par exemple cette grande quantité d'énergie permet à la matière d'entrer dans un **état de plasma**.

**Explication** : à l'état solide, les atomes sont fermement emprisonnés dans un réseau rigide (comme dans la glace par exemple). Lorsque l'on monte en température, on passe à l'état liquide (la glace se liquéfie), où les atomes peuvent glisser les uns par rapport aux autres, ce qui permet au liquide d'épouser la forme d'un récipient. Si on chauffe encore, on arrive à l'état gazeux : les atomes se déplacent alors librement, indépendamment les uns des autres (l'eau s'est transformée en vapeur). Enfin, quand on arrive à de très hautes températures (typiquement **plusieurs millions de degrés**, comme dans le Soleil), les constituants de l'atome se séparent, noyaux et électrons se déplacent indépendamment et forment un mélange globalement neutre : **c'est un plasma** (qui n'a rien à voir avec le plasma sanguin !).



L'ITER est un réacteur où l'on crée un état de plasma artificiellement pendant une durée très courte. Ce dispositif existe au stade expérimental.

Il permettra, si l'on réussit à maintenir cet état assez longtemps de lancer à l'intérieur une fusion nucléaire comme dans le Soleil !

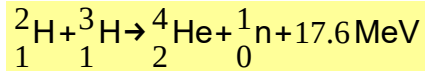
Les ingénieurs espèrent alors recueillir plus d'énergie que l'appareil en consomme. Pour l'instant ce n'est pas le cas !

Le but est de remplacer les énergies fossiles par cette énergie illimitée (si ça marche!) pour réduire l'émission de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère qui réchauffe trop notre planète.

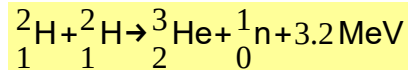
## 1.2 Les réactions de fusion nucléaire

Les éléments atomiques qui s'utilisent normalement dans les réactions de fusion nucléaire sont des atomes d'hydrogène et de ses isotopes : le deutérium et le tritium. Voyons quelques exemples de réactions de fusion :

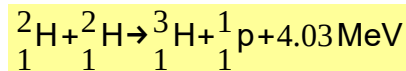
ex 1 : fusion d'un noyau de deutérium avec un noyau de tritium : on obtient un noyau d'hélium constitué par deux neutrons et deux protons, avec libération d'un neutron et 17.6MeV d'énergie.



ex 2 : fusion de deux noyaux de deutérium, on obtient un noyau d'hélium constitué de deux protons et un neutron, libérant un neutron et 3.2MeV d'énergie.



ex 3 : fusion de deux noyaux de deutérium, on obtient un noyau de tritium, un proton et 4.03MeV d'énergie.

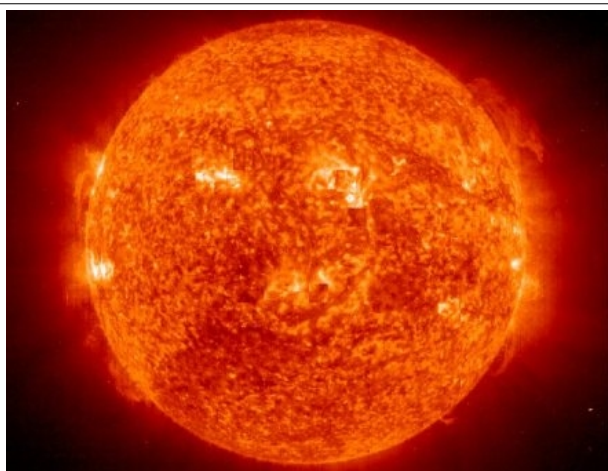


Pour que ces réactions aient lieu, il faut communiquer l'énergie cinétique nécessaire aux noyaux permettant ainsi de surmonter les forces de répulsion électrostatique et les faire fusionner. Pour ce faire, il faut chauffer le gaz à des températures très élevées.

Les conditions pour faire fonctionner un réacteur de fusion nucléaire artificiel est de confiner le plasma dans une enceinte avec la température et une densité suffisamment élevée de particules et pendant le temps nécessaire pour permettre aux réactions de fusion de se déclencher tout en empêchant les particules de s'échapper et obtenir un gain net d'énergie. Le bilan d'énergie du réacteur dépend de l'énergie nécessaire pour chauffer et confiner le plasma. Celle-ci doit être inférieure à l'énergie libérée par les réactions de fusion nucléaire. Ce type de réacteur n'est pas encore vraiment opérationnel.

En principe, chaque milligramme de deutérium peut être obtenu à 335MJ.

## 2. FUSION NUCLÉAIRE DANS LA NATURE



Les étoiles, y compris le soleil, sont le siège des réactions de fusion nucléaire.

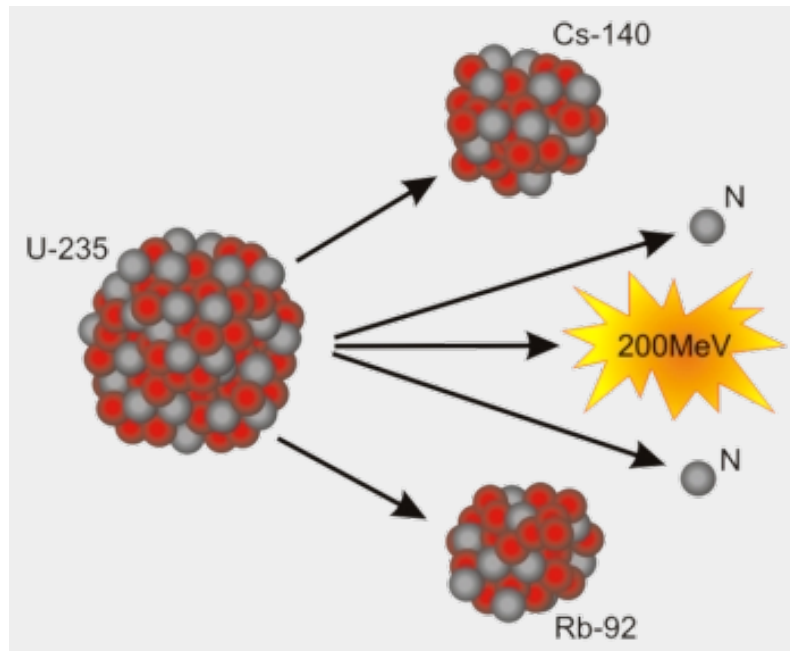
La lumière et la chaleur que nous ressentons du soleil est le résultat de ces réactions de fusion nucléaire, les noyaux d'hydrogène entrent en collision et fusionnent résultant en un noyau d'hélium plus lourds libérant une énorme quantité d'énergie.

L'énergie libérée atteint la Terre sous la forme de rayonnement électromagnétique. A l'intérieur du soleil, la température est de près de 15millions de degré Celsius.

## 3. LA FISSION NUCLÉAIRE

### 3.1 Définition

Il existe deux façons différentes d'obtenir de l'énergie grâce à la manipulation de noyaux d'un ou de plusieurs atomes : l'union de noyaux d'atomes différents (il s'agit alors de fusion nucléaire) ou la division des noyaux d'un atome déterminé (c'est le cas de la fission nucléaire).



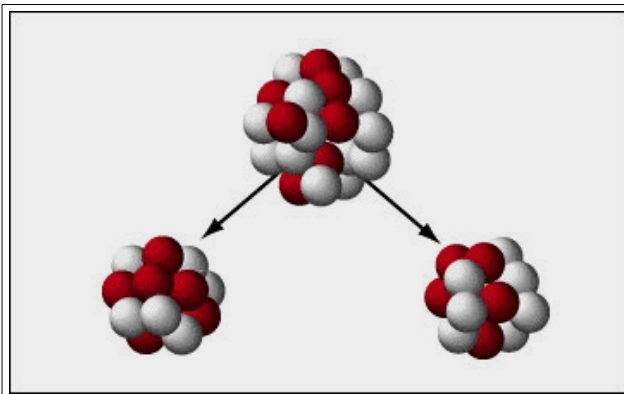
Dans le domaine de l'énergie nucléaire, nous dénommons fission nucléaire la division d'un noyau d'un atome lourd. Le noyau se transforme en différents fragments plus deux ou trois neutrons.

La somme des masses de ces fragments est inférieure à la masse initiale. Ce manque de masse se transforme en énergie selon l'équation d'Einstein :  $E = mc^2$ .

La fission nucléaire peut se produire lorsque le noyau d'un atome lourd capture un neutron (fission induite) ou de façon spontanée en raison de l'instabilité de l'isotope (fission spontanée).

### 3.2 Réaction de fission spontanée

Pour ce type de réaction, l'absorption d'un neutron extérieur n'est pas nécessaire.



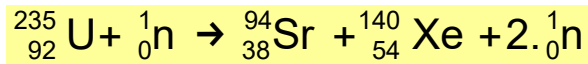
Certains isotopes de l'Uranium et surtout du Plutonium ont une structure atomique si instable que la fission se produit spontanément. Le taux de fission nucléaire spontanée est la probabilité par seconde qu'un atome donné subisse une fission de façon spontanée, c'est-à-dire sans aucune intervention externe

Le Plutonium 233 a un taux de fission spontanée très élevé par rapport au taux de fission spontanée de l'Uranium

### 3.3 La fission de l'uranium 235

Cette réaction est utilisée dans les réacteurs de centrales nucléaires . Les neutrons doivent être ralentis pour pouvoir briser le noyau d'uranium.

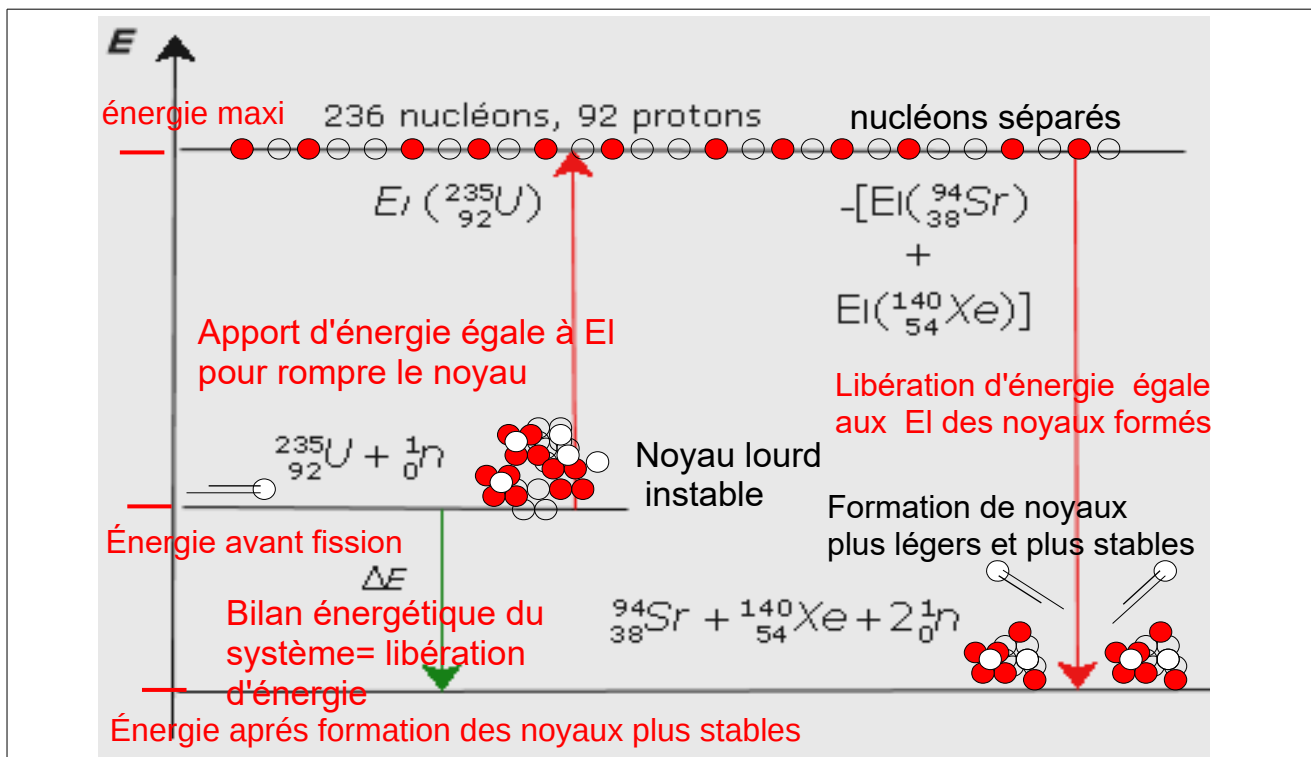
#### A-Equation de la transformation :



#### B- Diagramme énergétique de cette fission

Le diagramme ci-dessous a été décomposé arbitrairement en phases qui n'ont pas d'existence réelle mais cela permet d'effectuer un bilan énergétique du système formé par les 236 nucléons sur l'ensemble de la transformation. Nous distinguons :

- 1-La phase d'apport d'énergie par le milieu extérieur pour dissocier le noyau d'uranium sous l'impact d'un neutron en mouvement
- 2-Cette dissociation entraîne en théorie l'obtention des nucléons séparés (protons et neutrons) n'ayant plus d'interaction entre-eux. Le système possède alors l'énergie maximum .
- 3-Enfin, nous observons la phase de libération d'énergie par le système vers le milieu extérieur pour former les deux noyaux et les deux neutrons à partir des 236 nucléons séparés .



Le symbole « **EI** » signifie « **énergie de liaison** ». En formant un noyau à partir des nucléons séparés, le système cède une énergie égale l'énergie de liaison du noyau et le système gagne en stabilité.

Plus le système est en bas dans le diagramme , plus il est stable

**Le bilan** (flèche verte) est **négatif pour le système** :  $\Delta E < 0$  et positif pour le milieu extérieur :  $E_{\text{libérée}} > 0$ . **Cette énergie cinétique et de rayonnement** est transformée en énergie électrique dans les centrales nucléaires.

### C. Bilan massique

#### Application :

Déterminer le défaut de masse de la fission de l'uranium 235 sachant que les masses des noyaux sont les suivants :

$$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,0087 \text{ u} ; m_{\text{U}235} = 234,9935 \text{ u} ; m_{\text{Sr}94} = 93,8945 \text{ u} ; m_{\text{Xe}140} = 139,8920 \text{ u}.$$

$$\begin{aligned} \Delta m &= \Sigma m(\text{réactifs}) - \Sigma m(\text{produits}) > 0. \\ \Delta m &= m_n + m_{\text{U}235} - (m_{\text{Sr}94} + m_{\text{Xe}140} + 2 \cdot m_n). \\ \Delta m &= m_{\text{U}235} - m_{\text{Sr}94} - m_{\text{Xe}140} - m_n. \\ \Delta m &= 0,1983 \text{ u}. \\ \Delta m &= 0,1983 \times 1,67 \cdot 10^{-27} = 3,31 \cdot 10^{-28} \text{ kg}. \end{aligned}$$

La perte de masse correspondante à la fission d'un noyau d'uranium sous l'impact d'un neutron est donc de **3,31.10<sup>-28</sup>kg**.

### D. Bilan énergétique

On peut évaluer l'énergie libérée à partir de la perte de masse en kg :(relation d'Einstein)

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 3,31 \cdot 10^{-28} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 9,93 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

A l'échelle du noyau des atomes, il est commode de transformer cette énergie en MeV

Sachant que,  $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$  :

$$E = \frac{9,93 \cdot 10^{-12}}{1,6 \cdot 10^{-13}} = 185 \text{ MeV}$$

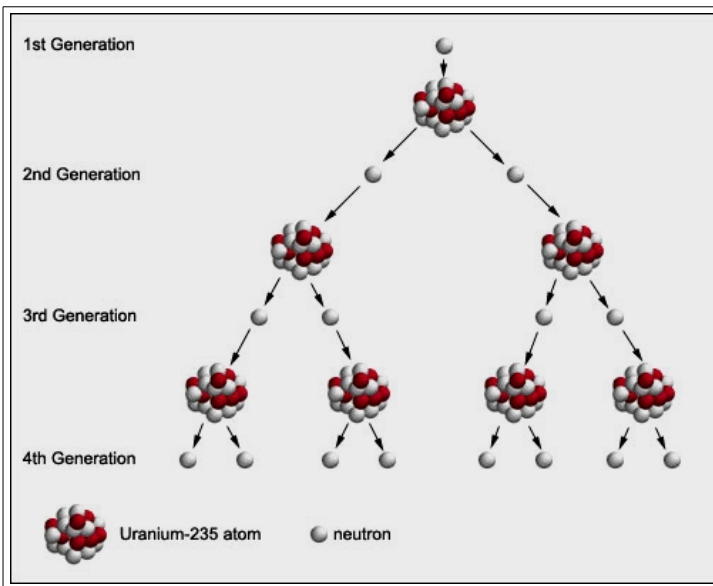
Ou plus simplement à partir de la perte de masse convertie en unité et sachant que 1u possède une énergie égale à 931,5MeV

$$E = 0,1983 \text{ u} \cdot 931,5 \text{ MeV} \cdot \text{u}^{-1} = 185 \text{ MeV}.$$

**On peut montrer que cette énergie est considérable : en effet 1 g d'uranium pur libère 72,6 milliards de joules alors qu'1 g de pétrole en libère seulement 42000J**

### E .Réaction de fission en chaîne

Nous venons de voir que la réaction nucléaire fournit plus de neutrons qu'elle n'en consomme. Cela permet d'envisager une autre fission et d'entretenir ainsi la réaction.



Une réaction en chaîne est un processus par lequel les neutrons libérés lors de la première fission nucléaire produisant une fission supplémentaire dans au moins un noyau de plus.

Ce noyau à son tour produit des neutrons et le processus se répète.

Ces réactions en chaîne peuvent être contrôlées ou non.

Les réactions contrôlées sont les réactions nucléaires dont l'objectif est de produire de l'énergie nucléaire constamment.

On contrôle la réaction en ralentissant les neutrons .

Cette énergie libérée est utilisée pour chauffer l'eau des centrales thermiques qui ensuite produisent du courant électrique.

Une réaction de fission non contrôlée n'est autre qu'une «bombe atomique»!

## 4. L'extraction de l'uranium

### 4.1 L'extraction

L'uranium est un **métal** assez répandu dans le sous-sol de la Terre. Il est contenu dans des **minerais**, qui sont extraits de gisements à ciel ouvert ou en galeries souterraines. Ces gisements se trouvent essentiellement en Australie, aux États-Unis, au Canada, en Afrique du Sud et en Russie.

### 4.2 Le traitement

Le minerai est réduit en petits morceaux, finement broyé et soumis à des opérations chimiques pour en extraire l'uranium. Cela permet d'obtenir **un uranium très concentré**, sous forme d'une poudre jaune appelée **yellow cake**. 1 000 t de minerai donnent de 1,5 à 10 t de yellow cake, contenant 75 % d'uranium. Le yellow cake est ensuite **raffiné** pour le débarrasser de ses impuretés et obtenir un uranium complètement pur.

### 4.3 L'enrichissement

À ce stade, 1 kg d'uranium naturel est composé de 993 g d'**uranium 238** et de 7 g d'**uranium 235**.

**Seul l'isotope uranium 235 est fissile** mais il n'est pas en proportion suffisante pour être utilisable dans les réacteurs des centrales. L'uranium doit donc être enrichi en uranium 235, de façon à ce qu'il en comporte entre 30 et 50 g.

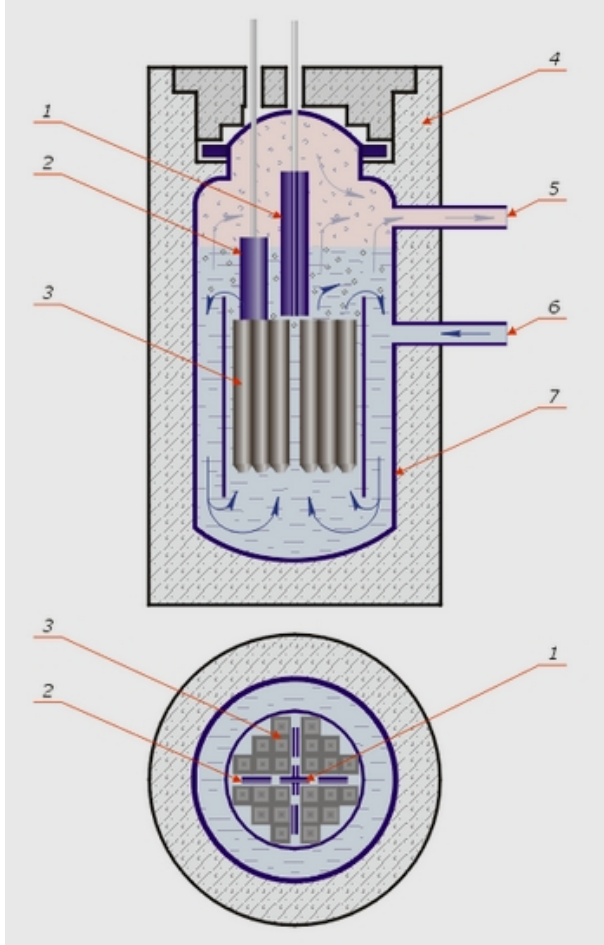
### 4.4 La fabrication du combustible

Une fois enrichi, **l'uranium est transformé en poudre noire**. Comprimée et cuite au four, elle donne des petits cylindres d'environ 7 g et de 1 cm de long, appelés **pastilles**. Chaque pastille peut libérer autant d'énergie qu'1 t de charbon.

Les pastilles sont **enfilées dans des tubes en métal** de 4 m de long dont les extrémités sont bouchées, pour constituer ce que l'on appelle des **crayons**. Ces crayons sont regroupés par lots dans des



**assemblages combustibles.** Ces assemblages sont placés dans le cœur du réacteur pour le faire fonctionner.



### Réacteur à eau pressurisée

1. barre d'arrêt d'urgence
2. [barre de contrôle](#)
3. assemblage [combustible](#) « [crayons](#) »
4. protection biologique
5. sortie de vapeur
6. entrée de l'eau
7. protection thermique

L'eau sert à la fois de fluide caloporteur ( qui transporte la chaleur) et de ralentisseur à neutrons.

En effet la fission de l'uranium 235 ne peut se produire que si les neutrons ont une faible énergie cinétique.

Les barres de contrôle captent les neutrons

Les barres sont descendues et placées entre les crayons pour ralentir ou arrêter le réacteur .

L'eau est sous pression ce qui permet de monter sa température vers 250°C sans atteindre son point d'ébullition.

## 4.5 La consommation

**Les pastilles vont séjourner entre 4 et 5 ans** dans le réacteur et subir des réactions de fission nucléaire.

Au fil du temps, elles vont s'épuiser en uranium 235 et devront être remplacées. Cette opération s'effectue dans l'eau car elle permet de piéger les rayonnements radioactifs. Le combustible utilisé reste ensuite pendant 3 ans en piscine de refroidissement, le temps de perdre peu à peu une partie de sa radioactivité.

## 4.6 Le retraitement

Dans la plupart des pays, le combustible utilisé est mis dans des conteneurs d'acier et transporté vers **une usine de retraitement**. Celle de La Hague (AREVA), en France, dans le département de la Manche, est la plus grande installation de retraitement du monde.

Le retraitement consiste à **séparer les différents éléments du combustible** par des traitements mécaniques et chimiques de façon à les réutiliser et également à séparer les déchets. Ainsi, l'uranium est à nouveau enrichi pour produire du combustible nucléaire. **96 % du combustible utilisé est réutilisé.**

La partie du combustible utilisé qui ne peut pas être réutilisée, appelée **déchets ultimes**, est coulée dans du verre en fusion et entreposée pendant 30 à 40 ans à l'usine de La Hague.