

# REACTIONS NUCLEAIRES

## 1. Stabilité des noyaux. Courbe d'Aston

Le défaut de masse est la différence entre la somme des masses des nucléons constituant le noyau et la masse du noyau lui-même :

$$\text{défaut de masse} = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m(X_Z^A).$$

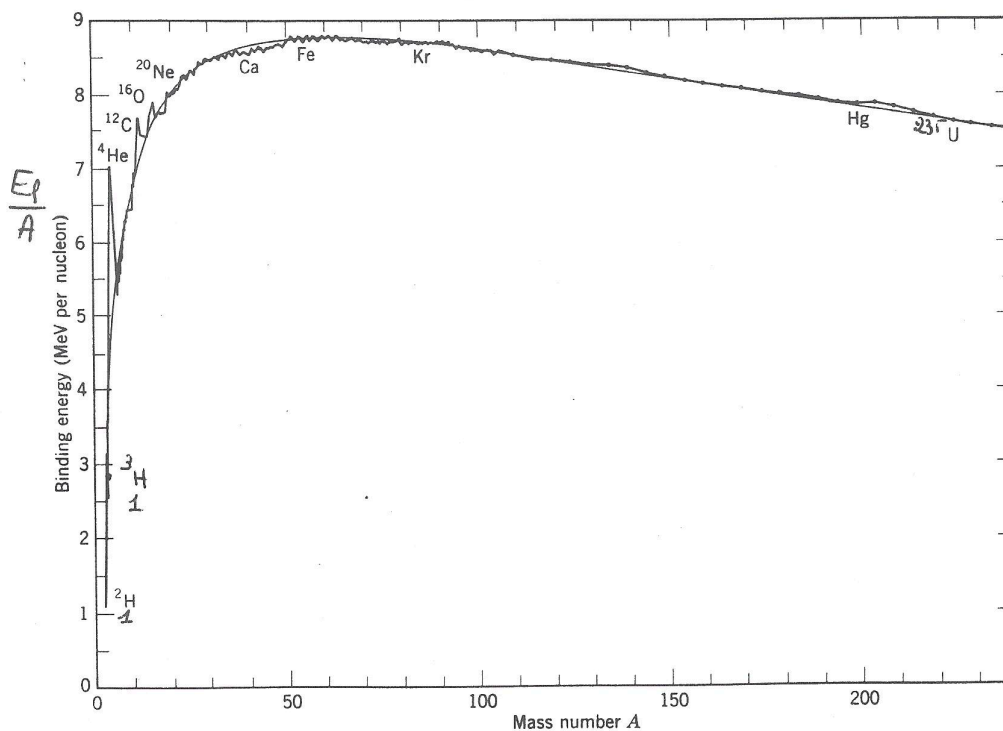
D'après Einstein, à ce défaut de masse correspond une énergie. Cette énergie est l'énergie de liaison  $E_l$  des nucléons dans le noyau

$$E_l = \text{défaut de masse} \cdot c^2.$$

L'énergie de liaison est l'énergie qu'il faudrait fournir pour séparer complètement un noyau de ses différents constituants. La courbe d'Aston donne l'énergie de liaison moyenne par nucléon  $E_l/A$  en fonction de  $A$ . Pour la majorité des nucléons, ce rapport est de l'ordre de 8 MeV.

Rem. : l'unité d'énergie est le joule, mais on utilise fréquemment en physique nucléaire l'électron-volt ( $1eV = 1,6 \cdot 10^{-19} J$ ) et le mégaélectron-volt ( $1MeV = 10^6 eV = 1,6 \cdot 10^{-13} J$ ).

Plus le rapport  $E_l/A$  est grand, plus le noyau est stable. Pour  $50 < A < 75$ , la courbe présente un maximum très aplati qui correspond aux nucléides les plus stables ( $E_l/A = 8,7 MeV$ ). Les éléments les plus stables ont groupés autour de  $A = 60$  (Cu, Ni); le nucléide le plus stable est le  $Fe^{56}$ . Pour  $A > 100$ , la courbe décroît lentement : les nucléides correspondants (nucléides lourds) sont moins stables. L'uranium est le moins stable des nucléides lourds.



On remarque que les nucléides légers montrent une instabilité particulière, notamment les deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium ( $H_1^2$ ) et le tritium ( $H_1^3$ ). Par contre, l'hélium est stable.

En général, les noyaux légers et lourds présentent une énergie de liaison par nucléon plus faible que les noyaux moyens. D'après la courbe d'Aston, on peut prévoir deux façons possibles d'extraire de l'énergie des noyaux : la **fission** et la **fusion**.

Si on provoque l'éclatement d'un noyau lourd en noyaux plus légers, il y aura perte de masse, donc libération d'énergie : c'est la **fission nucléaire**. Si on provoque l'union des noyaux légers à nucléons peu liés pour obtenir des noyaux à nucléons plus liés, il y aura ainsi perte de masse et libération d'énergie : c'est la **fusion nucléaire**.

## 2. La fission nucléaire

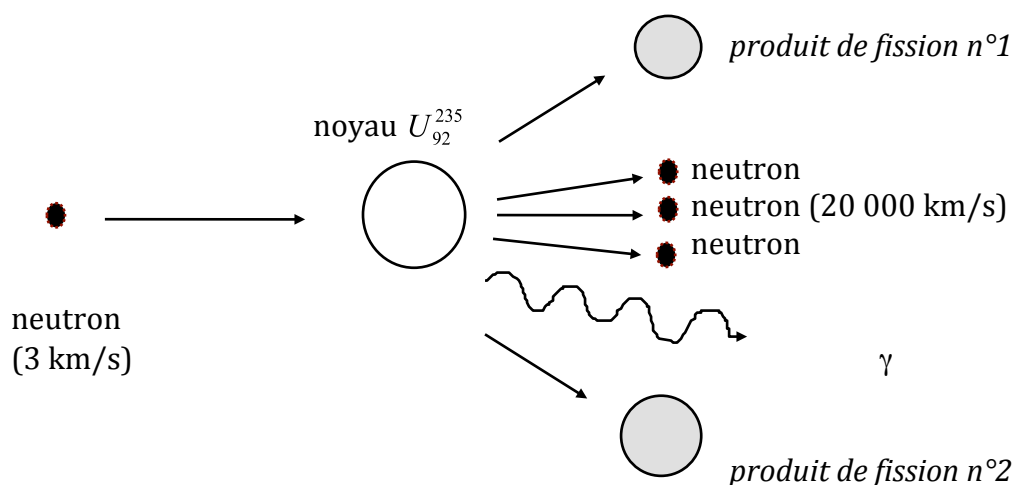
La fission nucléaire est une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle un noyau lourd éclate sous l'impact d'un neutron. Le neutron est un bon projectile car il n'a pas de charge électrique.

**Par contre les trajectoires des particules chargées  $\alpha$  et  $\beta$  seraient perturbées par les champs électriques des noyaux et des électrons. Les particules  $\alpha$  sont freinées par la répulsion exercée par les charges positives du noyau.**

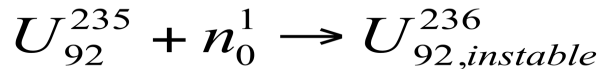
En 1938, à l'Université de Rome, le physicien Enrico FERMI découvre la fission de l'uranium en bombardant des noyaux de celui-ci avec des neutrons. La fission consiste en l'éclatement du noyau  $U_{92}^{235}$  bombardé par des neutrons lents de vitesse 2 à 3 km/s. Il en résulte des fragments de masse atomique moyenne.

Rem. : les noyaux de  $U^{238}$  ne sont pas fissiles. L'uranium  $U_{92}^{235}$  entre pour 0,7 % de la composition de l'uranium naturel.

### a. mécanisme de fission

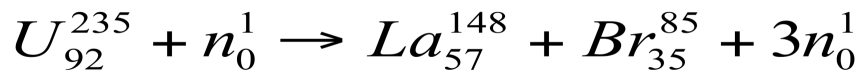
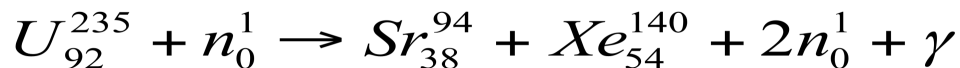


La réaction nucléaire peut s'écrire :



Le neutron est capté par le noyau  $U^{235}$  qui est instable. Il va se déformer et se scinder en deux fragments plus légers, suivant des masses inégales. La valeur de l'énergie cinétique du neutron incident a de l'importance. S'il est trop lent, le neutron rebondit sur le noyau trop rapide : il le traverse sans être capturé.

Différentes fissions sont possibles, par exemple



Cette équation vérifie les lois de conservation des nombres de masse et des charges.

La fission d'un noyau d' $U_{92}^{235}$  s'accompagne d'une libération d'énergie de l'ordre de 200 Mev. L'énergie libérée apparaît sous plusieurs formes :

- énergie cinétique des neutrons créés et des fragments;
- désexcitation des fragments.

Le nombre de neutrons secondaires émis à chaque fission est statistiquement de 2,46. Les produits de fission voient leur nombre atomique situé entre 30 et 42 pour le premier noyau et entre 51 et 59 pour le deuxième noyau. Le nombre de neutrons secondaires est donc souvent de 2 ou 3. Les produits de fission sont toujours instables, émetteurs de  $\beta$ .

### ***b. réaction en chaîne***

Celle-ci a été observée pour la première fois en 1939 par Frédéric JOLIOT-CURIE. Outre le fait qu'elle libère de l'énergie, l'aspect le plus important de la fission de l' $U^{235}$  est l'émission de nouveaux neutrons. Si leur vitesse est réduite à 2 ou 3 km/s et si la masse d'uranium est suffisante, les neutrons secondaires peuvent à leur tour provoquer les fissions d'autres noyaux d'uranium avec libération de nouveaux neutrons et ainsi de suite. Une réaction en chaîne peut alors se dérouler dans toute la masse d'uranium. Pour cela, il faut :

- une masse suffisante de matériau fissile,
- un ralentissement des neutrons secondaires à l'aide de « modérateur ».

### ***c. utilisation de l'énergie nucléaire***

Dans la bombe atomique, on laisse se multiplier le mécanisme de la réaction en chaîne; celle-ci devient explosive et en une durée très courte, il y a libération d'une énergie énorme. L'enrichissement d'une bombe en  $U^{235}$  dépasse 90%.

Dans un réacteur nucléaire, les réactions en chaîne sont contrôlées et l'énergie libérée est utilisée pour des besoins industriels. Le degré d'enrichissement de l' $U^{235}$  utilisé est de 3 ou 4 % dans le réacteur. La fission des noyaux d' $U^{235}$  libère de l'énergie que l'on récupère sous forme de chaleur.

### Centrale nucléaire

Une centrale nucléaire se distingue des autres types de centrales thermiques par le processus de production de vapeur : le reste de l'équipement mécanique est le même : la turbine est entraînée par la vapeur, l'alternateur accouplé à la turbine et les transformateurs distribuant le courant dans le réseau.

Dans les réacteurs nucléaires, la réaction de fission dans le combustible nucléaire, une fois amorcée, s'entretient d'elle-même à l'aide des neutrons libérés lors des fissions successives. La réaction reste contrôlée (libération contrôlée de l'énergie).

**Un réacteur nucléaire** comprend :

- le combustible ou matière fissile,
- le modérateur ou ralentisseur de neutrons,
- le fluide caloporteur et le système de refroidissement,
- les dispositifs de contrôle et de sécurité.

Le réacteur de Tihange 1 est constitué d'une cuve dont les parois de 25 cm d'épaisseur sont en acier inoxydable pour éviter les corrosions dues au contact avec les produits radioactifs. Une double enceinte de confinement en béton étanche enferme tous les éléments radioactifs produits dans la cuve. Le cœur des réacteurs est formé d'un assemblage de barreaux combustibles enfermés dans des gaines étanches en alliage de zirconium (il faut empêcher que les produits de fission se répandent dans le réacteur. Le rendement de l'unité 1 de la centrale de Tihange est de 31,4%.

### Modérateur

La possibilité de fission de l' $U^{235}$  augmente considérablement lorsque la vitesse des neutrons est de l'ordre de 3 km/s. La fission est près de dix mille fois plus probable avec des neutrons lents ou neutrons thermiques qu'avec des neutrons rapides. Sachant que les neutrons résultant de la fission sont émis à la vitesse de 20 000 km/s, il faut les ralentir à l'aide d'un **modérateur**. Le ralentissement des neutrons de fission est obtenu par les chocs sur les noyaux d'hydrogène du liquide caloporteur.

Les modérateurs les plus utilisés sont l'eau ordinaire, l'eau lourde, le carbone graphite, ...

L'eau lourde,  $D_2O$ , est un remarquable modérateur : elle absorbe très peu les neutrons, mais sa production est très onéreuse. L'eau ordinaire est un modérateur de qualité moyenne mais peu coûteuse.

### Fluide caloporteur

Son rôle est d'extraire la chaleur qui est produite par la fission et de la transporter jusqu'à un échangeur de chaleur, appelé **générateur de vapeur**. Le fluide doit donc être

un excellent conducteur de la chaleur mais ne peut absorber trop de neutrons pour ne pas gêner la réaction en chaîne. On utilisera :

- le gaz carbonique, l'air, l'azote, l'hélium;
- l'eau ordinaire, l'eau lourde.

A la centrale de Tihange, on utilise de l'eau ordinaire à la fois comme modérateur et liquide caloporteur. L'eau est sous pression de 155 bars. Le réacteur est du type PWR (**Pressurized Water Reaction**). L'énorme pression est obtenue à l'aide du pressuriseur dans le circuit primaire. Le courant d'eau ainsi échauffée dans le réacteur circule dans le circuit primaire et est dirigé vers un échangeur de chaleur où se fait le transfert d'une partie de son énergie à un autre fluide constitué par de l'eau qui circule de l'autre côté de la paroi des tubes. Cette eau circulant dans le circuit secondaire est chauffée par le fluide primaire et se transforme en vapeur d'eau qui est utilisée dans un groupe turbine-alternateur pour produire de l'énergie électrique.

### Dispositifs de sécurité

On sait que la fission d'un noyau  $U^{235}$  émet 2 ou 3 neutrons secondaires et que la réaction en chaîne ne peut se poursuivre que si les neutrons émis par une fission sont en nombre suffisant pour pouvoir provoquer ensuite de nouvelles fissions, sans être perdus ou capturés. Il ne faut pas que la réaction s'éteigne, ni qu'elle s'emballe. Le contrôle de la réaction en chaîne est possible grâce à des **barres de contrôle** en argent, cadmium qui peuvent absorber des neutrons. Ces barres peuvent, en cas de besoin, être introduites dans le cœur du réacteur entre les gaines de combustible. Elles sont maintenues au-dessus du réacteur et sont, à tout moment, prêtes à tomber. La chute de ces barres de contrôle est capable de stopper la réaction en chaîne en une durée très courte (1,3 s).

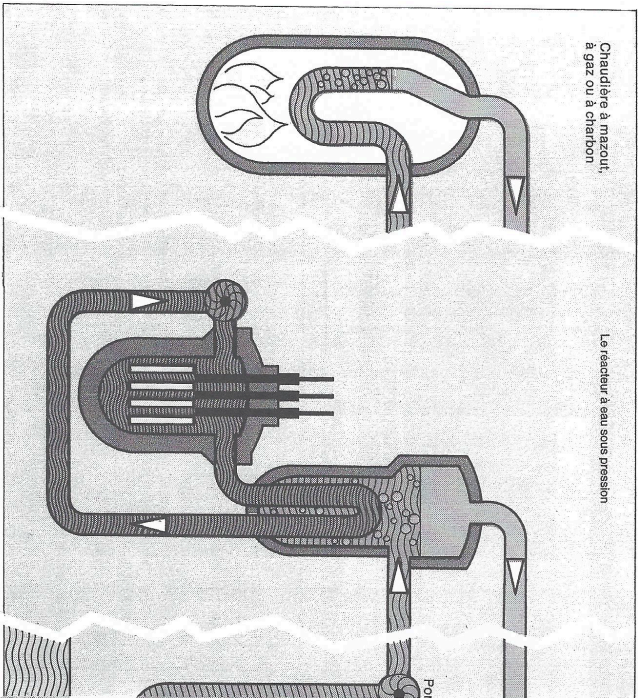
**Le second circuit** part du générateur de vapeur où se vaporise l'eau en contact avec des tubes chauds (dans lesquels circule l'eau venant du réacteur). La vapeur (haute température et haute pression) actionne une turbine située dans la salle des machines. La turbine entraîne le rotor (électro-aimant) de l'alternateur. Une tension élevée est produite (18 kV à Tihange 1 et 24 kV à Tihange 2 et 3). Des transformateurs élèvent la tension à 380 kV.

La vapeur d'eau détendue est ensuite liquéfiée grâce au **troisième circuit** d'eau (de Meuse pour Tihange) dans le condenseur. Puisée dans le fleuve, cette eau circule à grand débit; elle s'échauffe en prélevant la chaleur résiduelle de la vapeur. Celle-ci se liquéfie et une pompe la renvoie au générateur de vapeur. L'eau du circuit de refroidissement évacue la chaleur résiduelle à l'extérieur

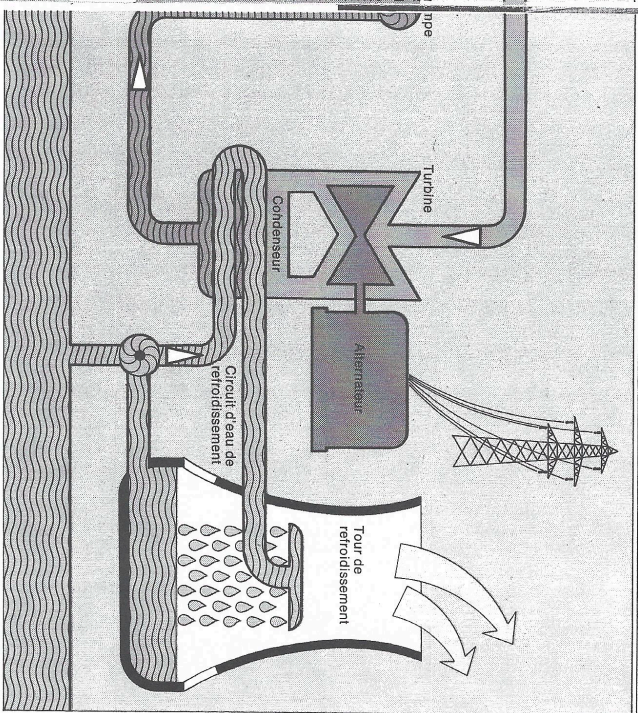
- si l'eau provient d'une rivière, elle y est reconduite un peu plus chaude. La rivière subit localement une augmentation de température;
- si les centrales sont construites à des endroits où il n'y a pas assez d'eau disponible ou s'il faut renoncer au refroidissement direct pour des raisons de protection des eaux, on réalise le refroidissement en circuit fermé. L'eau de refroidissement, une fois réchauffée par échange de chaleur avec la vapeur du circuit de la turbine, est conduite dans une tour dite de réfrigération; la chaleur résiduelle est alors cédée à l'air ambiant. Puis, cette eau, à nouveau plus froide retourne extraire la chaleur résiduelle du circuit de la turbine.

# Comment fonctionne une centrale nucléaire ?

## Production de vapeur



## Partie conventionnelle



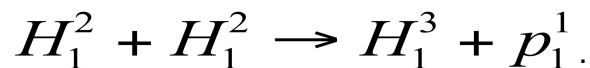
Une centrale nucléaire ne se distingue des autres types de centrales thermiques que par le processus de production de vapeur. Le reste de l'équipement mécanique est similaire : la turbine entraînée par la vapeur, l'alternateur accouplé à la turbine et les transformateurs distribuant le courant dans le réseau.

### 3. La fusion nucléaire

C'est le type de réaction nucléaire qui se déroule dans les étoiles. D'après la courbe d'Aston, pour scinder des noyaux légers comme par exemple le deutérium et le tritium, il faut fournir une énergie de 1 à 3 MeV par nucléon. S'il se forme à partir des nucléons séparés des noyaux plus lourds comme ceux d'hélium, on récupère une énergie de l'ordre de 7 MeV par nucléon. Il en résulte une libération d'énergie de 4 à 6 MeV par nucléon : la fusion de noyaux légers permet de libérer de l'énergie.

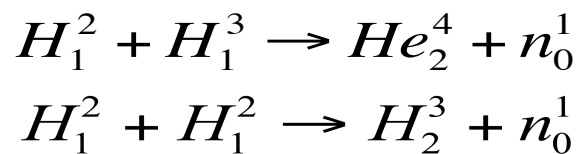
La fusion est une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle deux noyaux légers (de faible nombre de masse comme l'hydrogène) s'unissent pour former un noyau plus lourd (comme l'hélium).

Par exemple, deux noyaux de deutérium  $H_1^2$  peuvent fusionner pour donner du tritium  $H_1^3$  et un proton



Ces réactions sont à l'origine du rayonnement des étoiles et donc du Soleil. L'énergie libérée est appelée énergie thermonucléaire.

Autres réactions se produisant dans les étoiles :



Dans notre soleil, 600 millions de tonnes d'hydrogène se transforment à chaque seconde en 596 millions de tonnes d'hélium. Quatre millions de tonnes de matière disparaissent ainsi, libérant une énergie considérable.

Lors de l'explosion d'une bombe thermonucléaire (bombe H), l'énergie libérée est produite par des réactions de fusion non contrôlée. La réaction se déroule aussi grâce à une haute température fournie par l'explosion d'une autre bombe nucléaire utilisée comme amorce.

Le deutérium est présent dans l'eau des océans (30g /m<sup>3</sup>); le tritium radioactif est produit grâce au bombardement du lithium par des neutrons.

**La réaction de fusion ne peut avoir lieu à la température ordinaire** car, pour souder les deux noyaux de deutérium et de tritium, **il faut vaincre la répulsion électrostatique**. Pour vaincre cette répulsion il faut fournir aux noyaux suffisamment d'énergie cinétique grâce à une élévation de température. Mais, pour obtenir cette agitation, il faut chauffer le milieu à une température de 10<sup>9</sup> K. A cette température, le deutérium et le tritium sont complètement ionisés et forment ce que l'on appelle un **plasma**. Dans les étoiles, grâce à leur température élevée (supérieure à 10 millions de

Kelvins), l'agitation thermique est suffisante pour que les noyaux se rencontrent malgré les forces de répulsion.

Un plasma est un mélange en équilibre de noyaux positifs et d'électrons car l'agitation est telle qu'ils ne se recombinent pratiquement pas. Pour que le processus de fusion dure un certain temps, il faut que les noyaux de deutérium et tritium du plasma soient maintenus au voisinage les uns des autres pour qu'ils puissent se rencontrer malgré leur agitation : le plasma doit être **confiné**. Des parois matérielles sont exclues, aucun matériau connu ne peut résister à ces températures.

Il n'existe pas encore de réacteur maîtrisant la fusion nucléaire malgré des recherches qui durent depuis près de septante ans. En effet on doit avoir une température de 100 millions de Kelvins pendant un temps suffisamment long (au moins 10 min) tout en gardant le plasma éloigné des parois du réacteur par un champ magnétique, sans quoi les parois ne résisteraient pas. ITER est un vaste projet mondial de construction d'une machine expérimentale conçue pour exploiter l'énergie de la fusion. Trente-cinq pays dont la Chine, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les Etats-Unis se sont associés aux Etats de l'Union européenne pour collaborer durant 25 ans à cette réalisation qui est en construction en France.

L'objectif est de la plus haute importance car le combustible de fusion est quasiment inépuisable et le problème des déchets nettement moins sévère que pour les installations de fission.

Dans les centrales nucléaires actuelles, un des gros problèmes est effectivement le problème des déchets. Des technologies de **recyclage partiel de combustible** ont été mises au point et permettent une réutilisation d'une partie de ce combustible usagé (uranium enrichi). Ces opérations très complexes sont effectuées en France dans l'usine de la Hague dans le Cotentin.

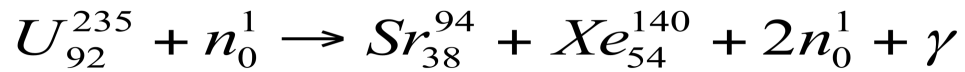
En Belgique, un organisme national est chargé de la gestion des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies : l'ONDRAF

Les déchets sont triés en fonction de leur activité et de leur durée de vie.



**Exercice sur la fission**

Dans un réacteur, une des réactions de fission est :



- 1) Calculer la perte de masse
- 2) Calculer l'énergie libérée par la fission d'un noyau d' $U^{235}$  en J en en MeV
- 3) Calculer l'énergie libérée par la fission de 5g d' $U^{235}$ . Quelle masse de pétrole de pouvoir calorifique égal à  $45 \cdot 10^6$  J/kg faudrait-il pour libérer la même énergie ?

Données

Masses atomiques :  $U^{235}$  : 235,04392 u.m.a.

$Sr^{94}$  : 93,91536 u.m.a.

$Xe^{140}$  : 139,91879 u.m.a.

$n_0^1$  : 1,00866 u.m.a.

$c = 3 \cdot 10^8$  m/s

1 u.m.a. =  $1,66054 \cdot 10^{-27}$  kg

1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J

1. Les valeurs de  $\alpha$  et de  $Z$  doivent vérifier la conservation du nombre de masse et du nombre de charges

$$235 + 1 = 94 + 140 + \alpha \Rightarrow \boxed{\alpha = 2}$$

$$92 = 38 + Z \Rightarrow Z = 54$$

2. Perte de masse =  $m_{avant} - m_{après}$

$$= [235,04392 + 1,00866] - [93,91536 + 139,91879 + 2 \cdot 1,00866]$$

$$= 0,20111 \text{ u.m.a.}$$

$$= 0,20111 \cdot 1,66054 \cdot 10^{-27}$$

$$= 3,339512 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$$

$$E = mc^2 \quad E = \text{énergie en J libérée par la fission d'un noyau}$$

$m$  = perte de masse en kg

$c$  = vitesse de la lumière en m/s

$$E = 3,339512 \cdot 10^{-28} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 3,00556 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

$$\text{On a vu que } 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \Rightarrow 1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$E = \frac{3,00556 \cdot 10^{-11}}{1,6 \cdot 10^{-13}} = 1878 \text{ MeV}$$

3. Calculons le nb d'atomes dans 5g d'uranium

$$= \frac{5}{235,04392} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}$$

$$= 1,28 \dots \cdot 10^{22}$$

L'énergie libérée par la fission de 5g d'uranium sera donc égale à :

$$E = 1,28 \dots \cdot 10^{22} \cdot 3,00556 \cdot 10^{-11}$$

$$E = 3,849 \cdot 10^{11} \text{ J}$$

Pour libérer une telle énergie, il faudrait la quantité de pétrole suivante :

$$\frac{3,849 \cdot 10^{11} \text{ J}}{45 \cdot 10^6 \text{ J/kg}} = 8553 \text{ kg de pétrole!}$$

←  
pouvoir calorifique

# Matière et énergie

---

Pour produire de l'énergie électrique, l'homme a utilisé différents types d'énergie. On fera la distinction entre les énergies renouvelables et les autres sources d'énergie

Dans les sources d'énergie non renouvelables on a les énergies fossiles (le pétrole, le gaz, le charbon) et l'énergie nucléaire (l'uranium)

Les énergies fossiles, on le sait, ont un impact négatif sur l'environnement et vont devenir de plus en plus rares et chères à l'avenir. L'énergie nucléaire sera abordée dans le chapitre suivant. La Belgique possède 7 réacteurs (Doel et Tihange) qui produisent environ 50% de l'énergie électrique produite.

Les énergies renouvelables sont :

a) l'énergie solaire :

En Belgique, une surface horizontale d'un  $m^2$  reçoit par an, en moyenne, une quantité d'énergie solaire d'environ 1000 kWh ( $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$ ). L'énergie solaire reçue sur l'ensemble du territoire belge représente environ 50 fois la consommation énergétique nationale.

Cette énergie peut être utilisée pour produire de **l'énergie thermique** : panneaux solaires thermiques ou capteurs solaires pour le chauffage d'eau sanitaire, le chauffage de la piscine. Le rendement de ces panneaux peut atteindre 40%, parfois 50%, par rapport à l'énergie solaire disponible.

Cette énergie peut aussi produire de **l'énergie électrique** : panneaux solaires photovoltaïques constitués de silicium qui convertissent directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Les panneaux transforment environ 15 % de l'énergie solaire captée en énergie électrique.

b) l'énergie du vent (les éoliennes) :

Dans une éolienne, l'énergie cinétique du vent est transformée en énergie cinétique de rotation des pales et du rotor laquelle est transformée en énergie électrique par un alternateur.

En 2017, le parc éolien en Belgique avait une puissance installée (puissance électrique maximale) d'environ 2400 MW, elle n'était que de 384 MW fin 2008. Ce secteur connaît une forte croissance.

La puissance d'une éolienne récente en Belgique est souvent de 2 à 6 MW. Il en existe de plus puissantes pour des projets en mer jusque 10 MW. S'il fallait aujourd'hui remplacer les centrales nucléaires par des éoliennes, il faudrait en construire des milliers !

L'avantage des éoliennes, c'est que cette forme d'énergie est non polluante. Elle est compatible avec l'activité agricole. Le bruit au pied de la tour est d'environ 55 dB. L'inconvénient majeur est le caractère intermittent du vent. Les éoliennes en général ne fonctionnent que si la vitesse du vent est comprise entre 10 et 90 km/h.

c) l'énergie hydraulique

d) la biomasse

Le terme biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale pouvant devenir source d'énergie.

Les agrocarburants sont des carburants liquides produits à partir de plantes cultivées comme le palmier à huile, le tournesol, le colza ....

Attention à la surexploitation. On a détruit les forêts de Malaisie (où vivent notamment les orang-outans) pour produire de l'huile de palme. On assiste parfois à l'accaparement de terres dans les pays pauvres (par exemple en Afrique) pour produire du biocarburant pour les pays riches, au détriment de cultures qui permettraient à la population locale de se nourrir !

En Wallonie la production nette d'électricité renouvelable était estimée en 2015 à 16,4 % de la production totale de toutes les sources confondues. Cette production est en constante augmentation.