



# Energie

Energies renouvelables

**Energie nucléaire**

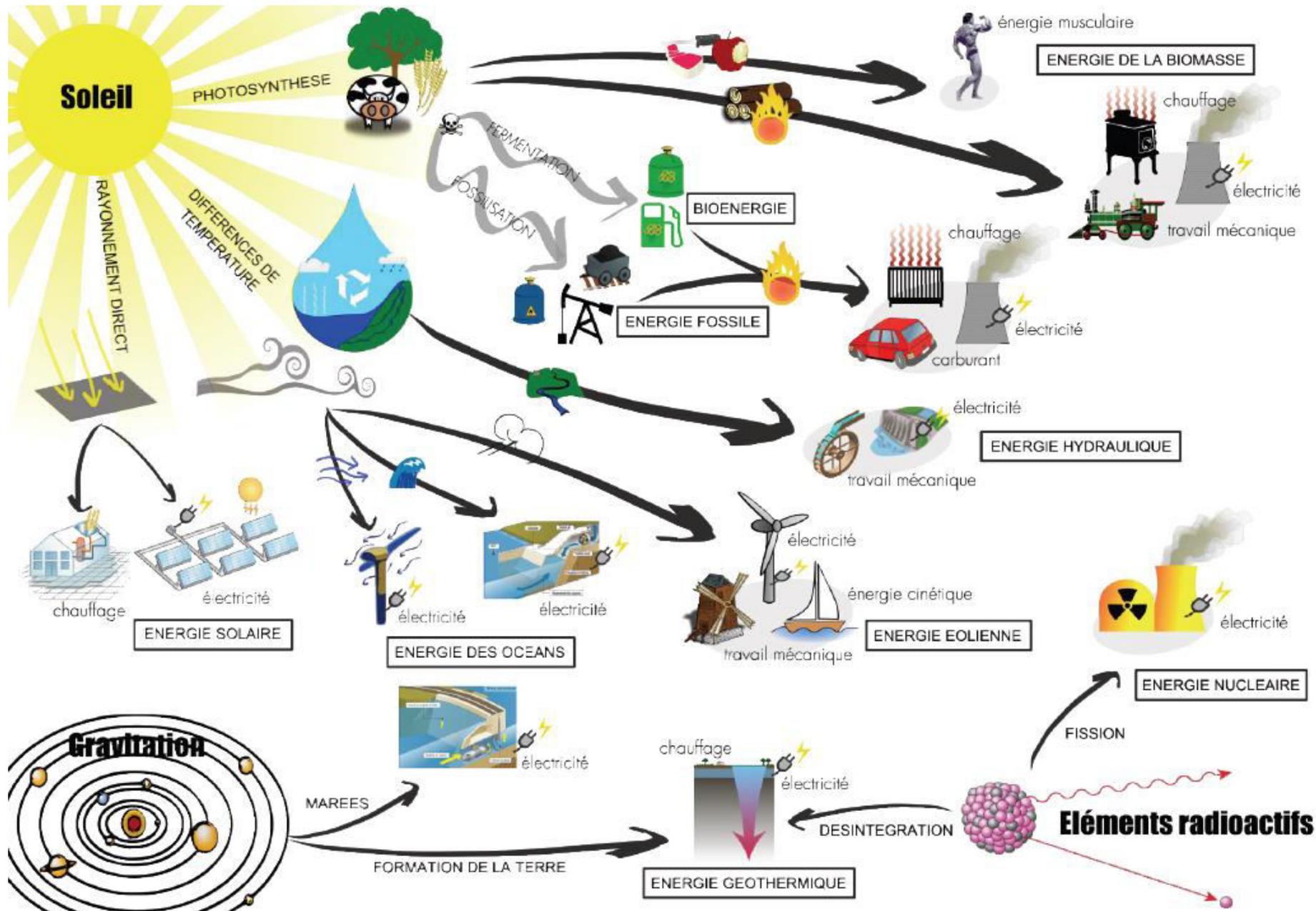
# Nous allons :

- Poser le problème de l'énergie dans son ensemble.
- Rappeler les conséquences de l'utilisation des énergies fossiles sur le climat.
- Passer rapidement en revue les alternatives aux énergies fossiles.
- Etudier en détail l'énergie nucléaire et voir si elle peut apporter une réponse acceptable.

# Les différentes formes d'énergie

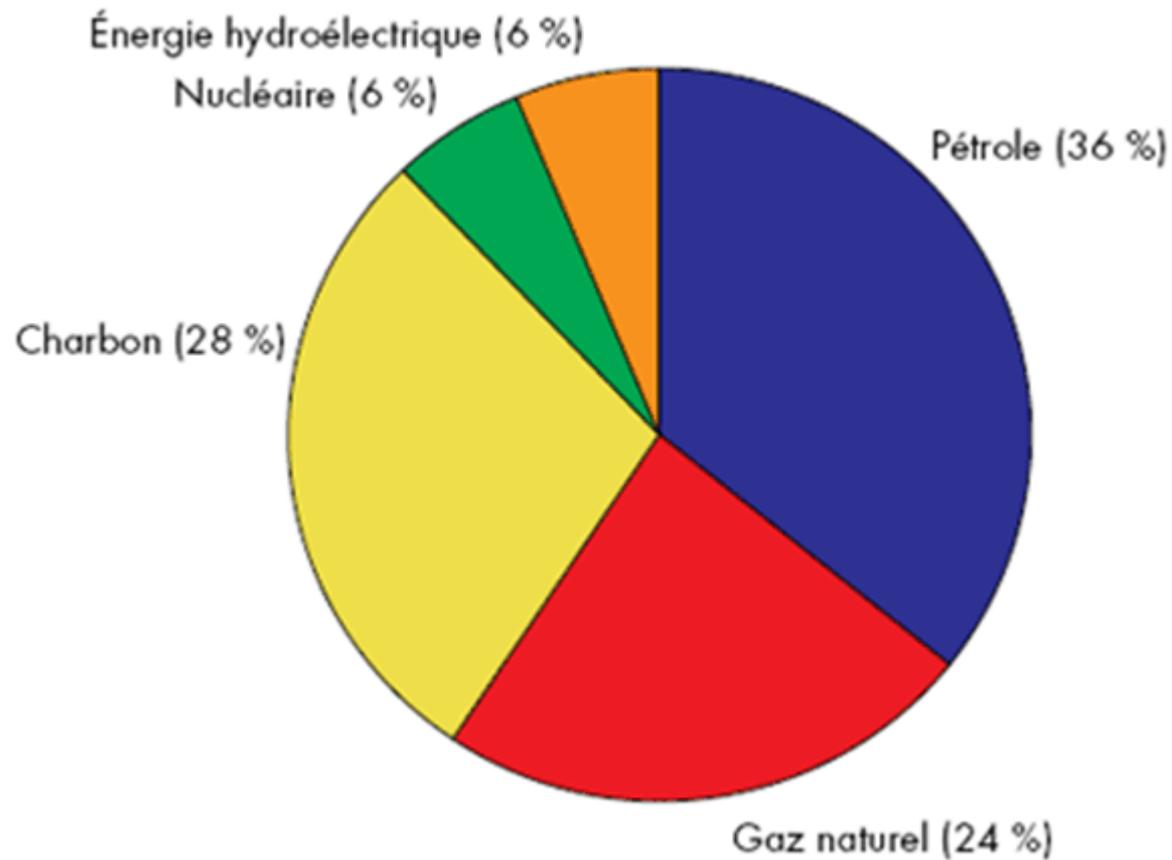






# La consommation d'énergie

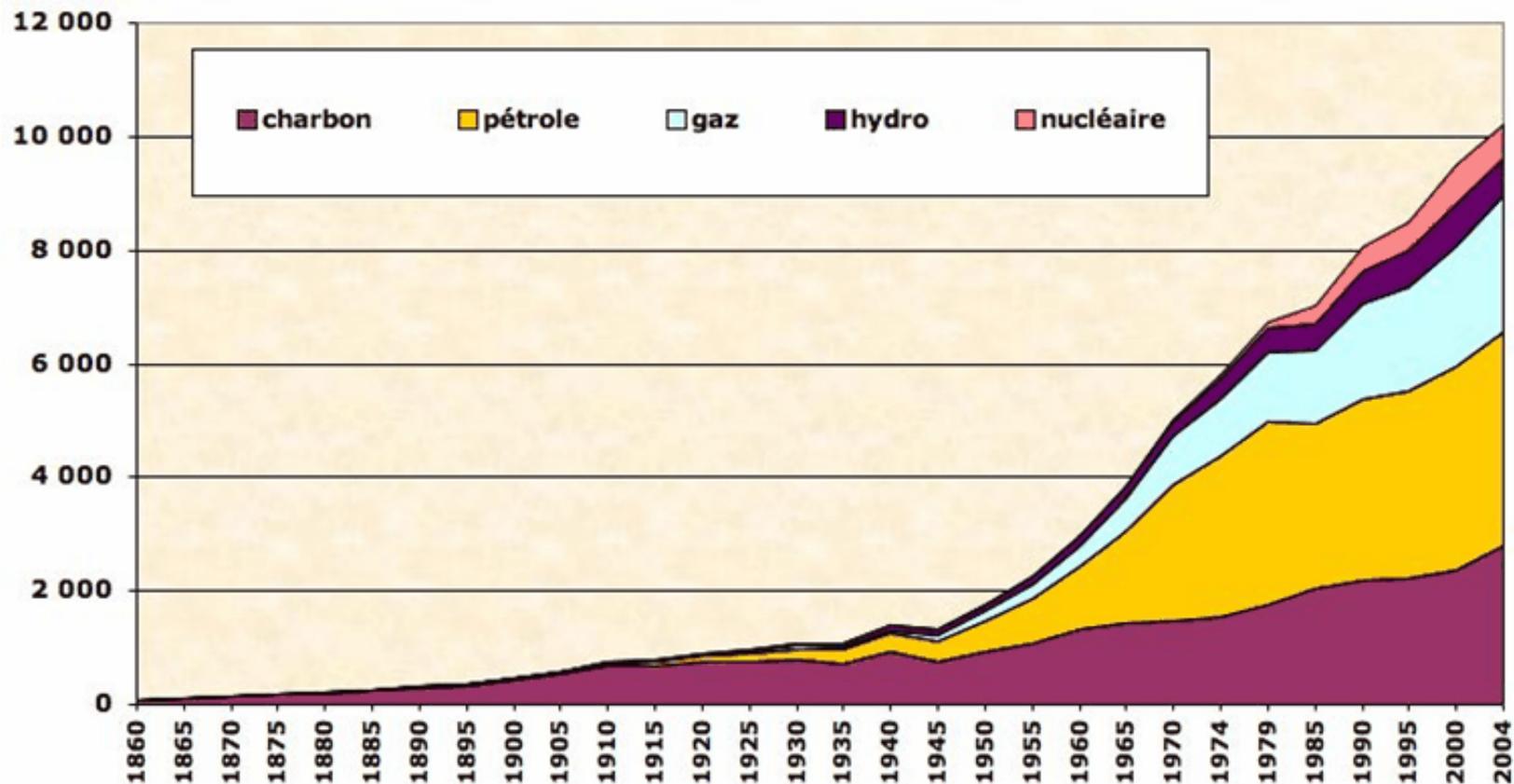
Consommation mondiale d'énergie primaire selon le combustible, 2006



Source : BP Statistical Review of World Energy, 2007

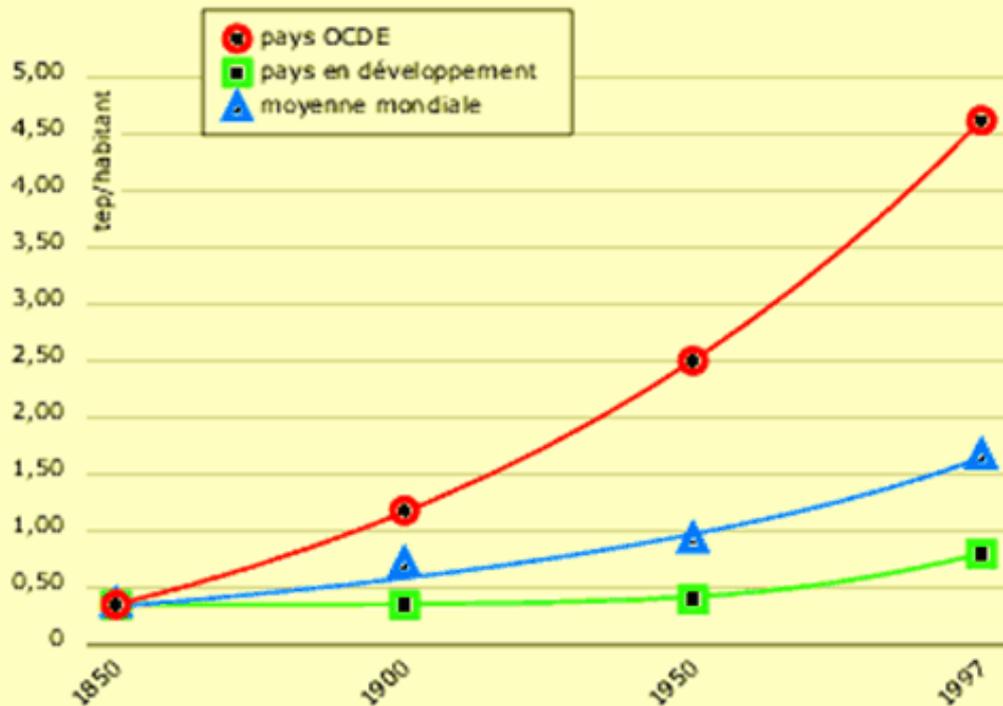
# Le problème de l'énergie

Evolution de l'utilisation des principales sources d'énergie



# Energie et développement

**Figure 2.3** Consommation intérieure brute d'énergie par habitant au niveau mondial, 1850-1997



SOURCE UNDP (2000). *World Energy Assessment*.

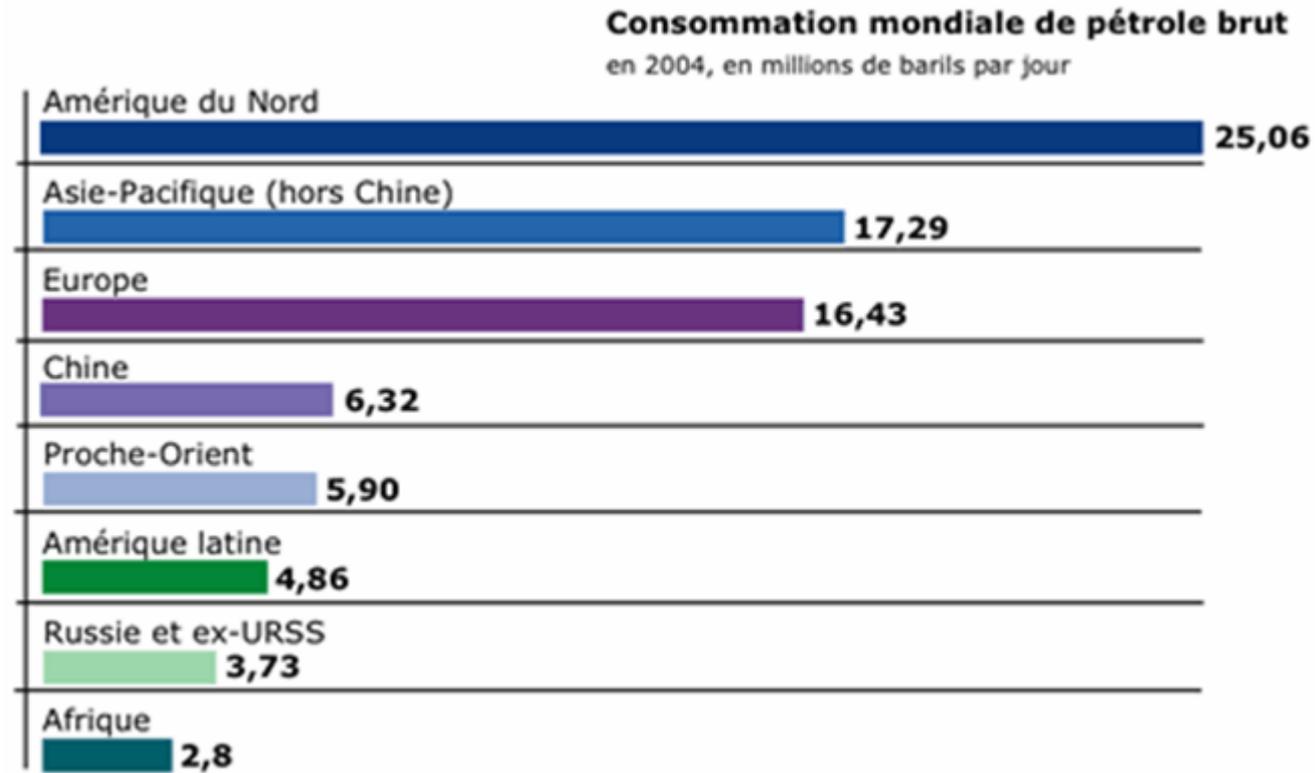
**Tableau 2.1**

Variation annuelle de la consommation intérieure brute d'énergie par habitant au niveau mondial de 1990 à 1997, en %

Pays OCDE	1,0%
<i>dont OCDE Europe</i>	0,5%
Pays en développement	2,1%
<i>dont Afrique</i>	0,0%
<i>dont Chine</i>	2,5%
Economies en transition	-5,4%

SOURCE UNDP (2000).  
*World Energy Assessment*.

# Consommation de pétrole



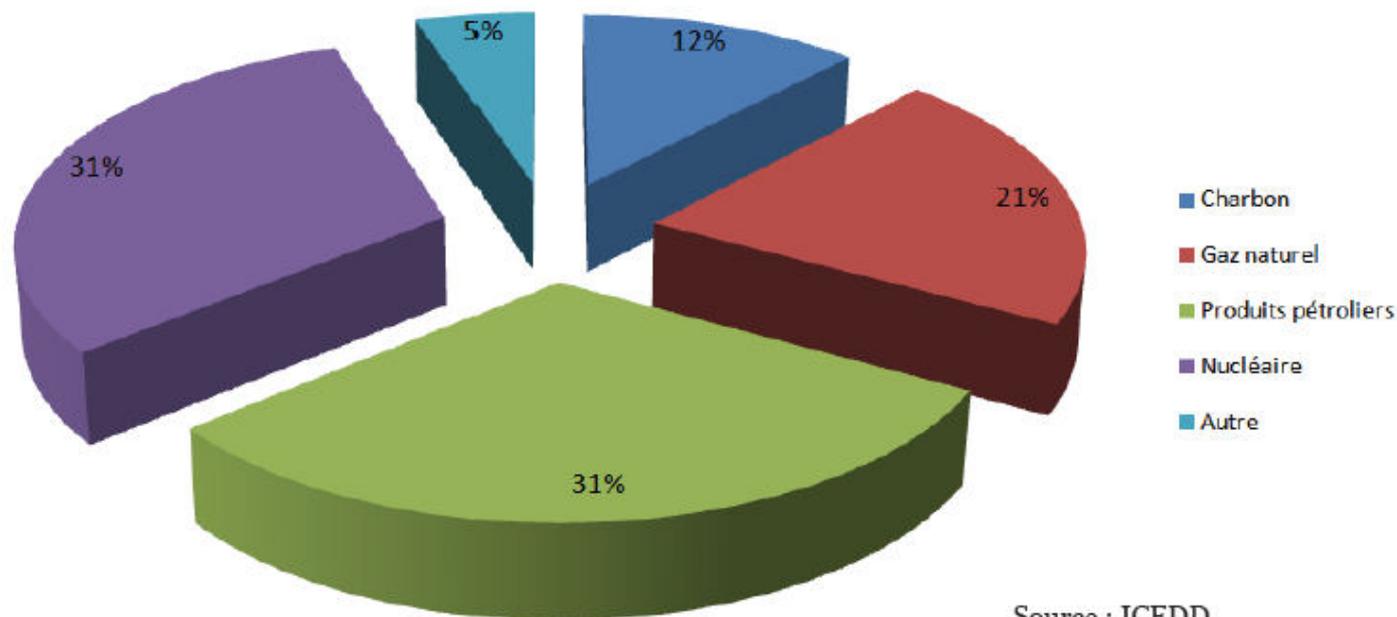
Les  $\frac{3}{4}$  des ressources sont consommés par  $\frac{1}{4}$  de la population



## La Wallonie à l'heure des combustibles fossiles



En Région wallonne, la satisfaction des besoins en énergie s'appuie encore largement sur les combustibles fossiles : ils représentent **deux tiers de la consommation** intérieure brute d'énergie.



Source : ICEDD



## Consommation des ménages : un secteur-clé

Les besoins résidentiels en énergie des ménages représentent près d'**un quart de la demande globale** en énergie en Région wallonne. Si on ajoute leurs déplacements, ils occupent le **second rang** des plus gros consommateurs d'énergie **derrière l'industrie**.

## Réerves mondiales

Estimer les réserves contenues dans les gisements est difficile. Les gisements étant invisibles et souterrains, la détermination de leur contenu porte un certain degré d'incertitude. Et **différentes personnes peuvent interpréter différemment les mêmes données...**

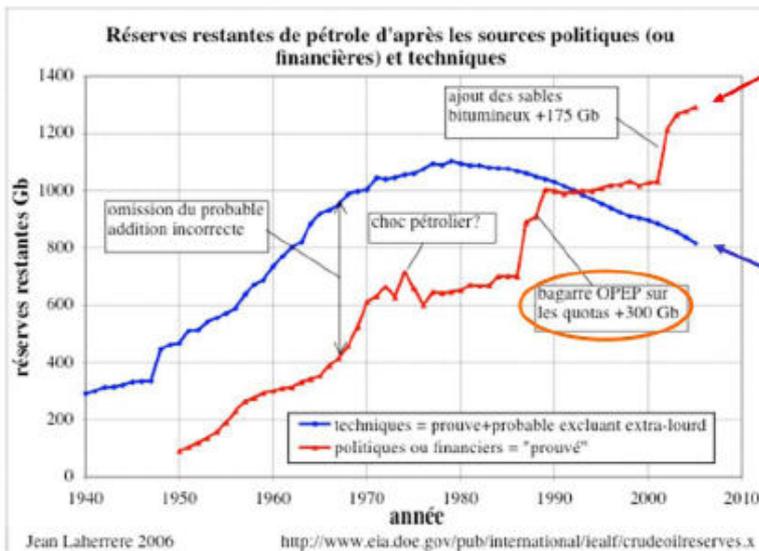
**Les réserves de pétrole sont basées sur des estimations.** Les géologues donnent donc une fourchette de 3 valeurs :

Minimum : Prouvées (= 1P)

Attendu : Prouvées + Probables (= 2P)

Maximum : Prouvées + Probables + Possibles (= 3P)

Le problème est qu'il n'y a pas de convention sur les chiffres utilisés. Quelques pays comme les USA utilisent des valeurs minimales, d'autres (par ex. l'ex-URSS) utilisent des valeurs maximales, et la plupart utilisent des valeurs 2P.



Les réserves publiées par les organismes internationaux (USDoE, WO, OGJ, BP review)

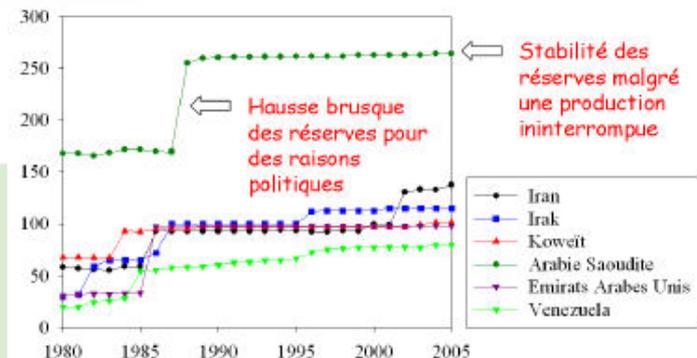
Les réserves qu'on espère extraire du sous-sol (= 2P)

Les réserves techniques diffèrent des réserves politiques :

- Jusqu'en 1990, les chiffres des réserves furent sous-estimés (réserves politiques inférieures aux réserves techniques).
- Depuis 1980, on découvre moins de pétrole qu'on n'en produit : les réserves diminuent. Pourtant, les données politiques disent le contraire...

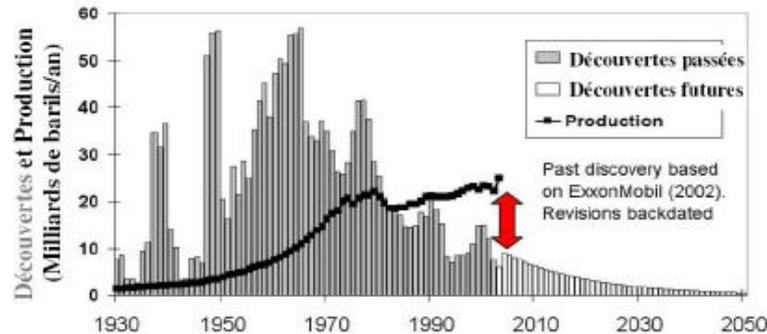
## Réserves "politiques" ?

Diverses raisons économiques et politiques peuvent influencer le volume des réserves déclarées officiellement. Par exemple, les pays producteurs peuvent surestimer leurs réserves pour obtenir des financements intéressants et les pays consommateurs peuvent aussi surestimer les réserves mondiales de pétrole pour apaiser les craintes de pénurie et pousser les prix du pétrole vers le bas.



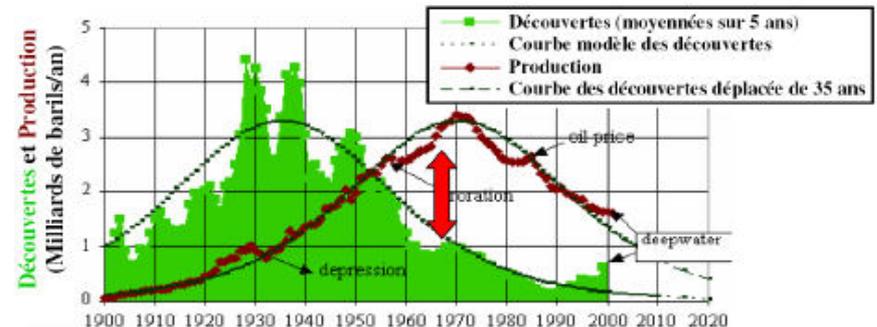
## Découvertes et production

La courbe des découvertes est l'un des outils les plus importants pour tenter de définir le moment où la production maximale - le Pic du pétrole - est atteinte : on ne peut pas produire du pétrole s'il n'a pas été découvert. Dès lors, lorsque les découvertes diminuent, la production aussi finira par diminuer.



A partir des années 60, les découvertes mondiales de pétrole sont en baisse constante (avec quelques sursauts occasionnels).

La courbe des découvertes reflète la courbe de production avec un décalage dans le temps qui varie d'un pays à l'autre. Les USA, par exemple, ont eu un décalage de 35 ans, alors que la Mer du Nord a eu un décalage de 25 ans. Quant aux découvertes mondiales de pétrole, elles ont atteint leur maximum il y a 40 ans...



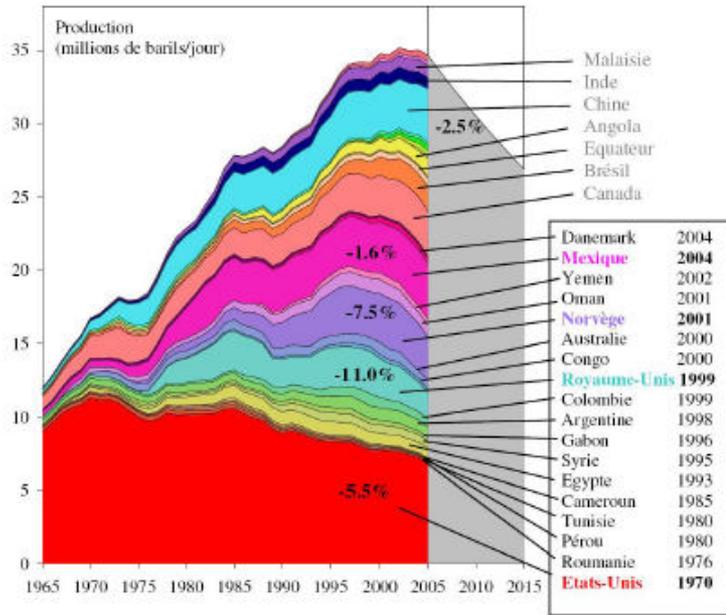
Il faut environ cinq ans pour passer de la découverte à la production d'un champ « offshore » et trois ans sur la terre ferme. Donc même si nous découvrons de grandes quantités dans le futur (ce que même l'industrie pétrolière estime comme peu probable), nous entamerons considérablement les réserves existantes avant de pouvoir produire ces nouveaux champs.

### Inverser la tendance ?

Pour tous ceux qui pensent que de nouvelles découvertes ou des moyens d'extraction plus élaborés apporteront une réponse au problème, il serait sage de jeter un coup d'œil à la production des USA. Elle décline depuis 1970 et, malgré tous les efforts du pays le plus riche et le plus avancé techniquement, la courbe ne s'inverse pas.

## Le Pic de production mondial

Il est atteint quand, au niveau de la planète, les découvertes de nouveaux gisements et leur développement ne se font pas assez rapidement pour combler le déclin des vieux gisements existants.

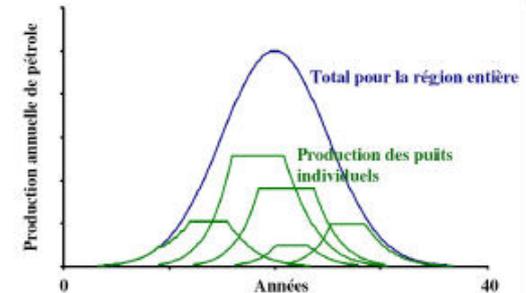


### Quand ?

De nombreux experts attendent un Pic pétrolier mondial dans l'intervalle 2005-2020. Nous pourrions déjà y être, car depuis 2005 la production mondiale de pétrole stagne. Et ce n'est qu'après avoir dépassé le Pic et avoir constaté que la production a décliné pendant plusieurs années que nous confirmerons avec certitude quand a eu lieu le pic.

### Pic de production ?

Pour des raisons géologiques et techniques, toute production de pétrole suit le schéma général suivant : la production augmente après les premiers forages, atteint un maximum lorsque environ la moitié des réserves extractibles ont été produites, puis diminue progressivement jusqu'à zéro.



La production de pétrole est en déclin dans 33 des 48 pays producteurs principaux (hors OPEP et ex-URSS). Quant à l'OPEP, sa production pourrait décliner au cours des prochaines années. La Russie possède également des capacités limitées de production supplémentaires.

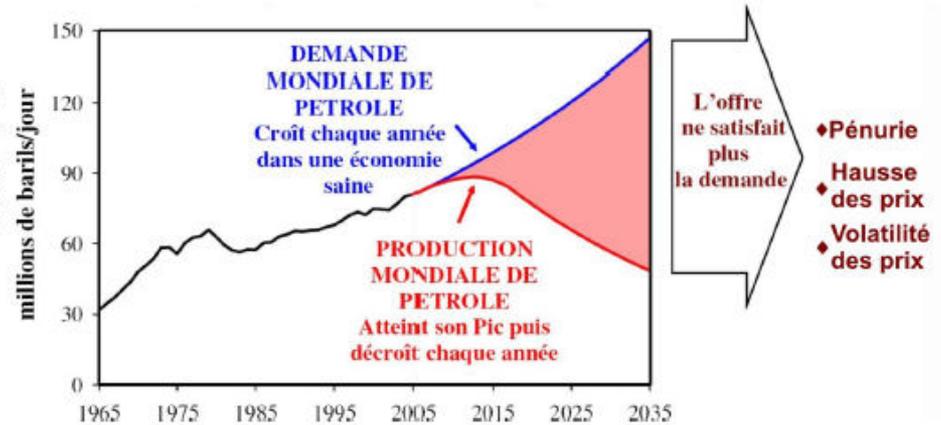
### Et le gaz ?

La situation du gaz est tout aussi préoccupante, car un nombre significatif de producteurs clés, assurant 50% de la production mondiale, sont entrés en déclin de façon largement inattendue, la plupart après l'an 2000 : les Etats-Unis, le Canada, le Royaume-Uni, les Pays-Bas, et les principaux gisements russes.

## Au-delà du Pic

Le problème qui nous attend n'est pas la fin du pétrole, mais la fin du pétrole bon marché sur lequel est basée notre société.

Du point de vue de l'économie, le moment où il n'y aura plus de pétrole importe peu. **Ce qui compte, c'est le moment où il y en aura moins.** En effet, passé le Pic de production, un déséquilibre croissant apparaîtra entre une demande qui augmente et une production qui diminue chaque année, entraînant tout d'abord **volatilité et hausse des prix**, et ensuite des **pénuries**.

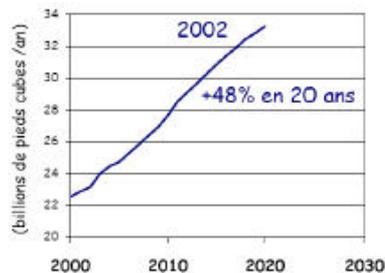


## Un cas d'école : la crise du gaz nord-américain

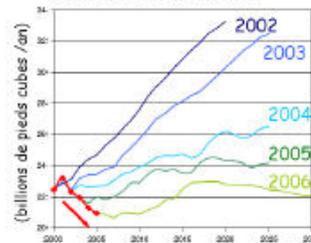
Le 'pic du gaz nord-américain' est un excellent modèle qui permet d'évaluer le passage du Pic mondial du pétrole.

En 2002, l'Administration de l'Information de l'Energie américaine (EIA) était optimiste...

Prévisions EIA pour l'approvisionnement des USA en gaz naturel nord-américain



Approvisionnement des USA en gaz naturel nord-américain: Prévisions EIA et Réalité



...mais la production déclina au lieu d'augmenter. L'EIA révisé à la baisse ses attentes, mais met plusieurs années à reconnaître le déclin, retardant toute action pour attaquer le problème. Pendant ce temps, les prix montent et deviennent volatils.

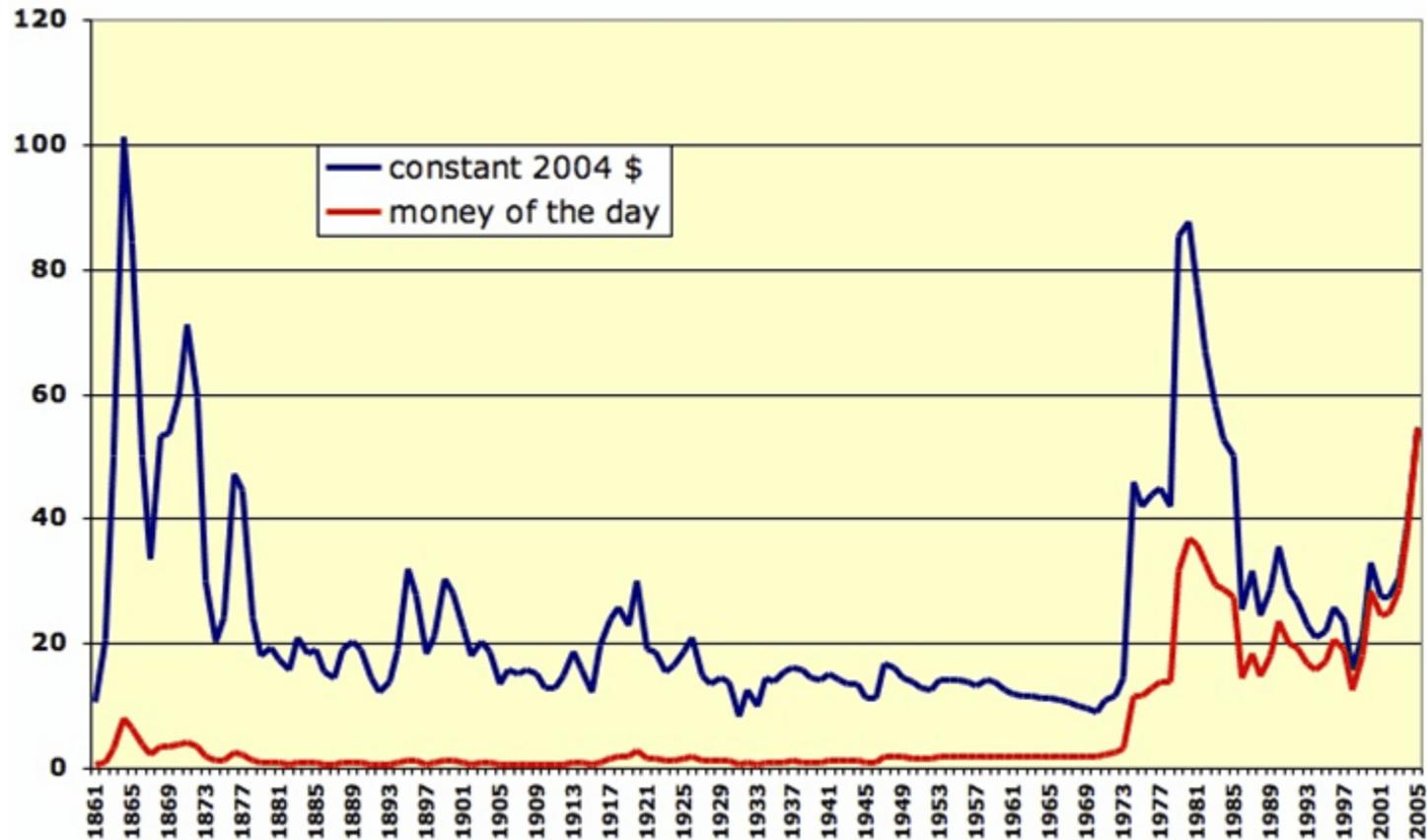
Prix du gaz naturel aux USA (\$/1000 pieds cubes - NYMEX)



Les Etats-Unis doivent faire face à des difficultés croissantes :

- délocalisations et pertes d'emplois liée à la crise du gaz (> 3 millions depuis 2000)
- augmentation de plus de 85% du coût de production de l'ammoniac (fabrication des engrais azotés) et répercussions sur l'agriculture
- difficultés à alimenter les nouvelles unités de production d'électricité (> 100 milliards \$ investis !)
- ...

# Le prix du pétrole



Evolution du prix du pétrole

# Au 11 mars 2011

**Le Cours du baril de pétrole en dollars: 101,78 \$** (-0.90% depuis hier).





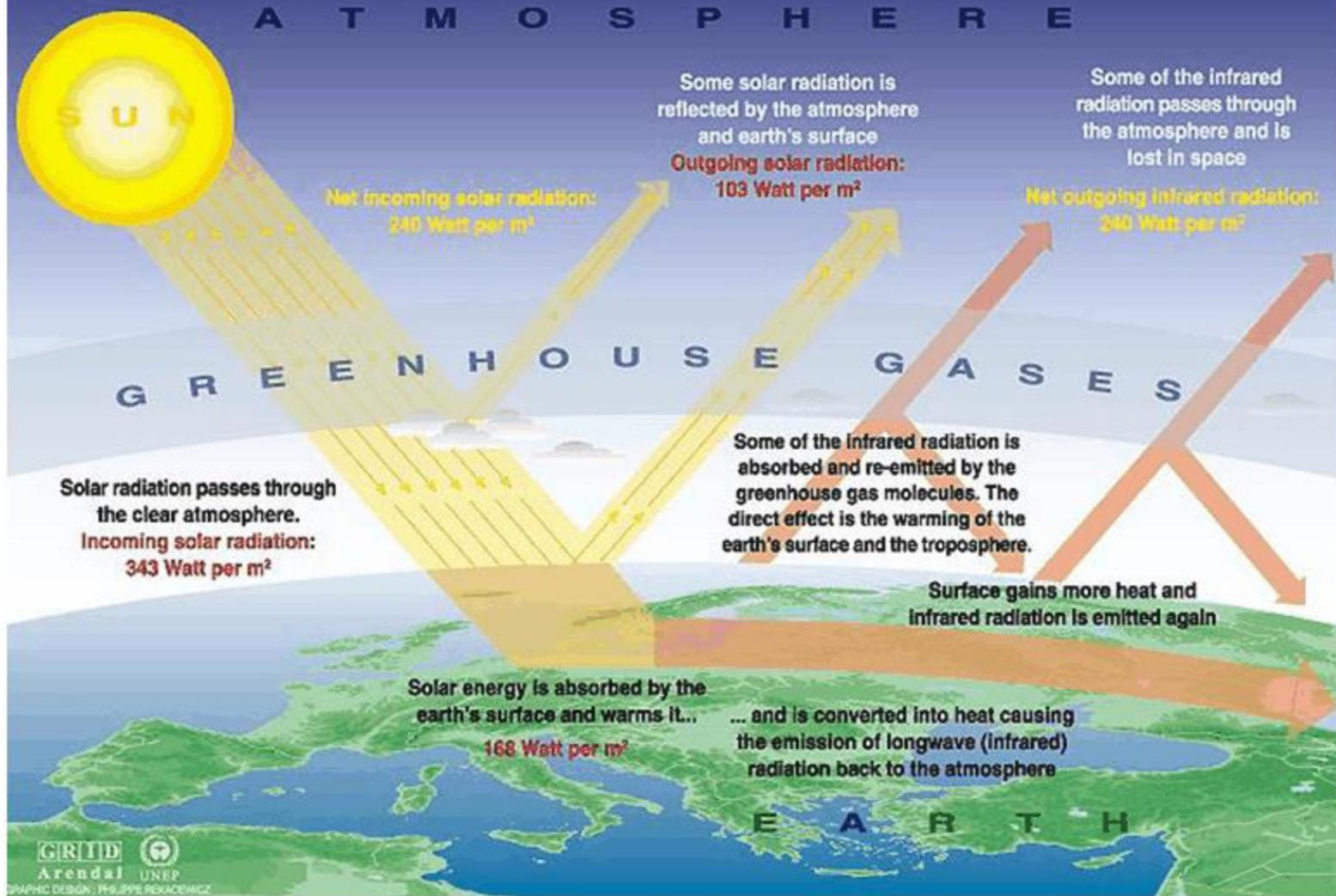
Le prix de l'essence à 5€  
le litre et le plein à 200€ :  
c'est pour demain.

Notre société de  
consommation étant  
basée sur une énergie  
abondante et bon  
marché, des adaptations  
majeures et très  
douloureuses sont  
inévitables.

# Quelques rappels sur le réchauffement climatique

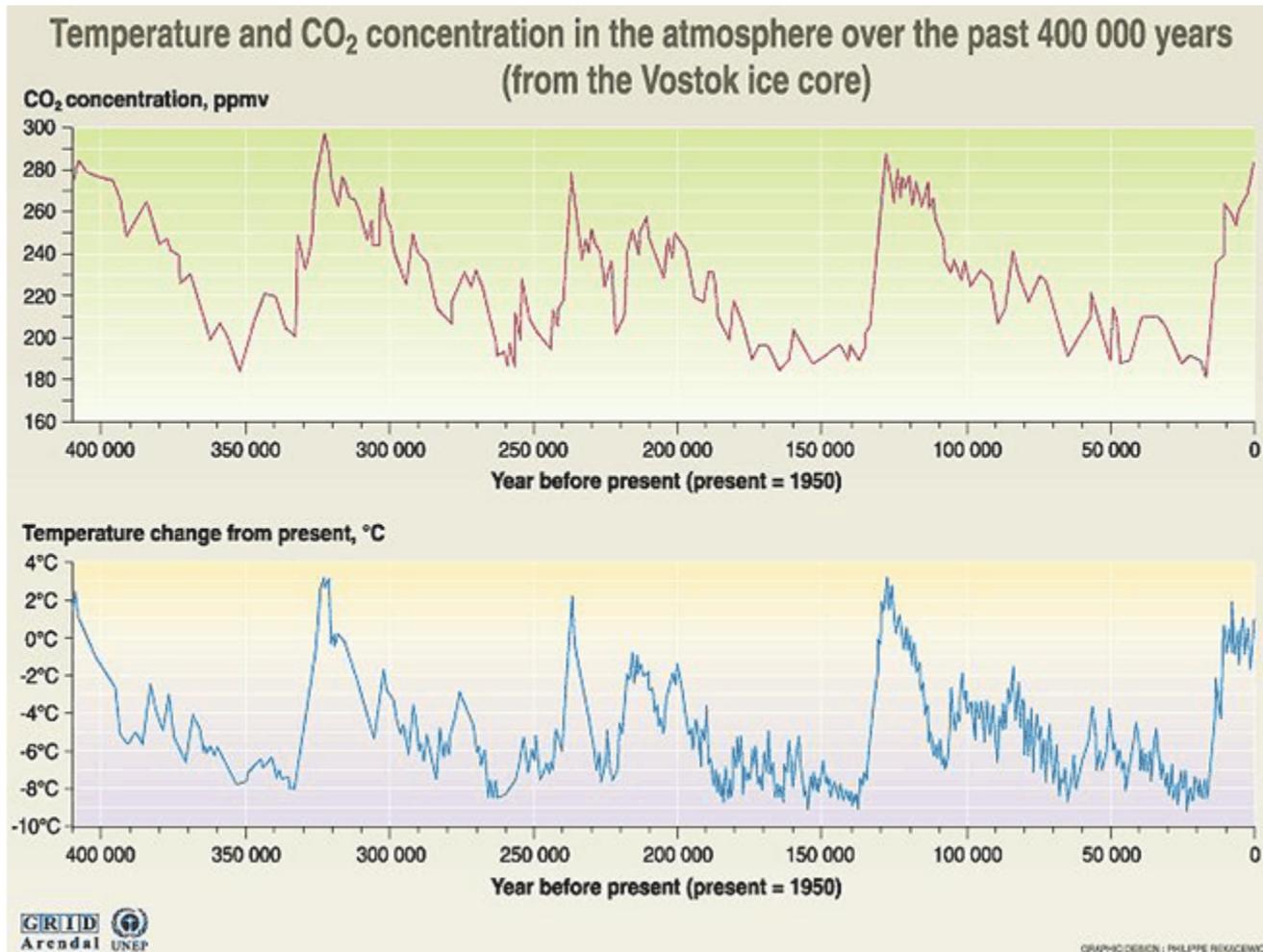


# The Greenhouse effect



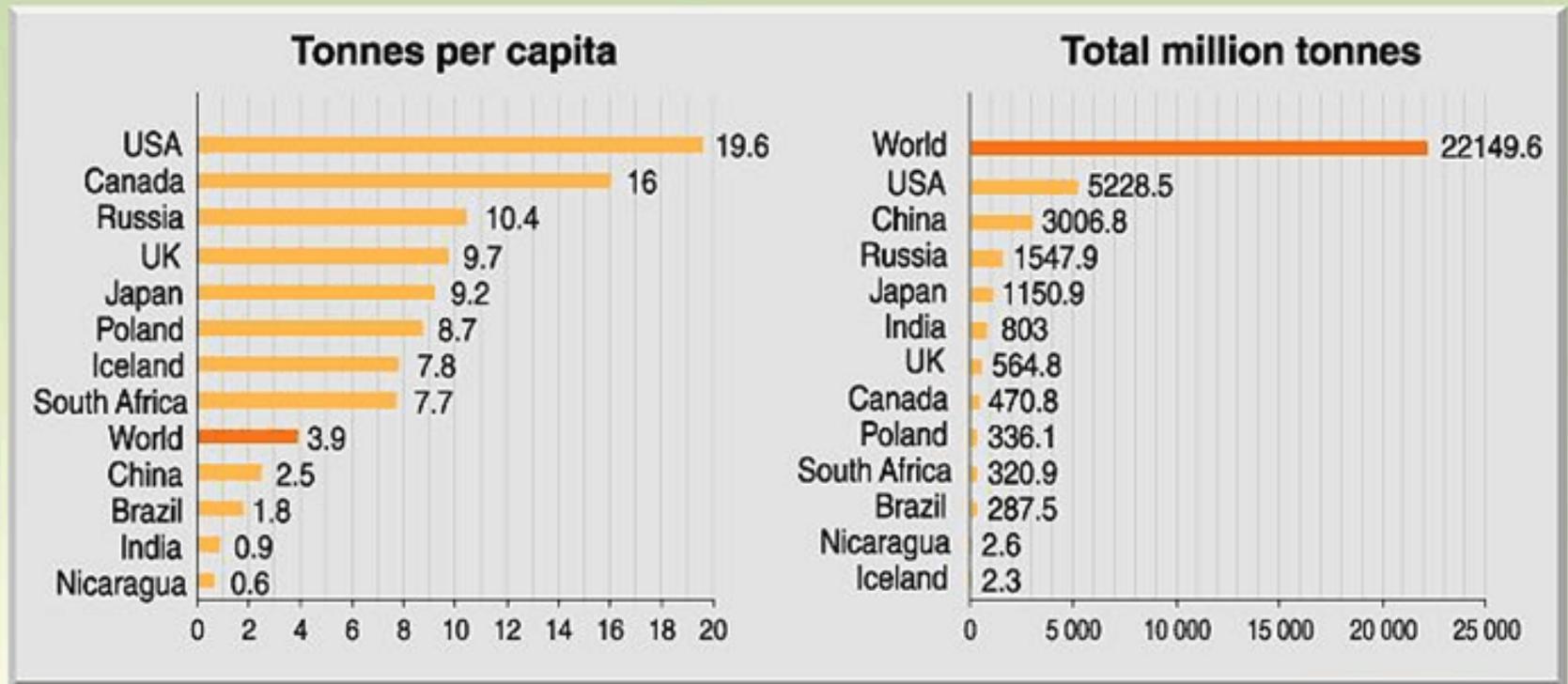
Sources: Okanagan university college in Canada, Department of geography, University of Oxford, school of geography; United States Environmental Protection Agency (EPA), Washington; Climate change 1995, The science of climate change, contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, UNEP and WMO, Cambridge university press, 1996.

# Réchauffement et CO<sub>2</sub>



Source: J.R. Petit, J. Jouzel, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica, *Nature* 399 (3June), pp 429-436, 1996.

## Emissions of CO<sub>2</sub> - selected countries (1995)



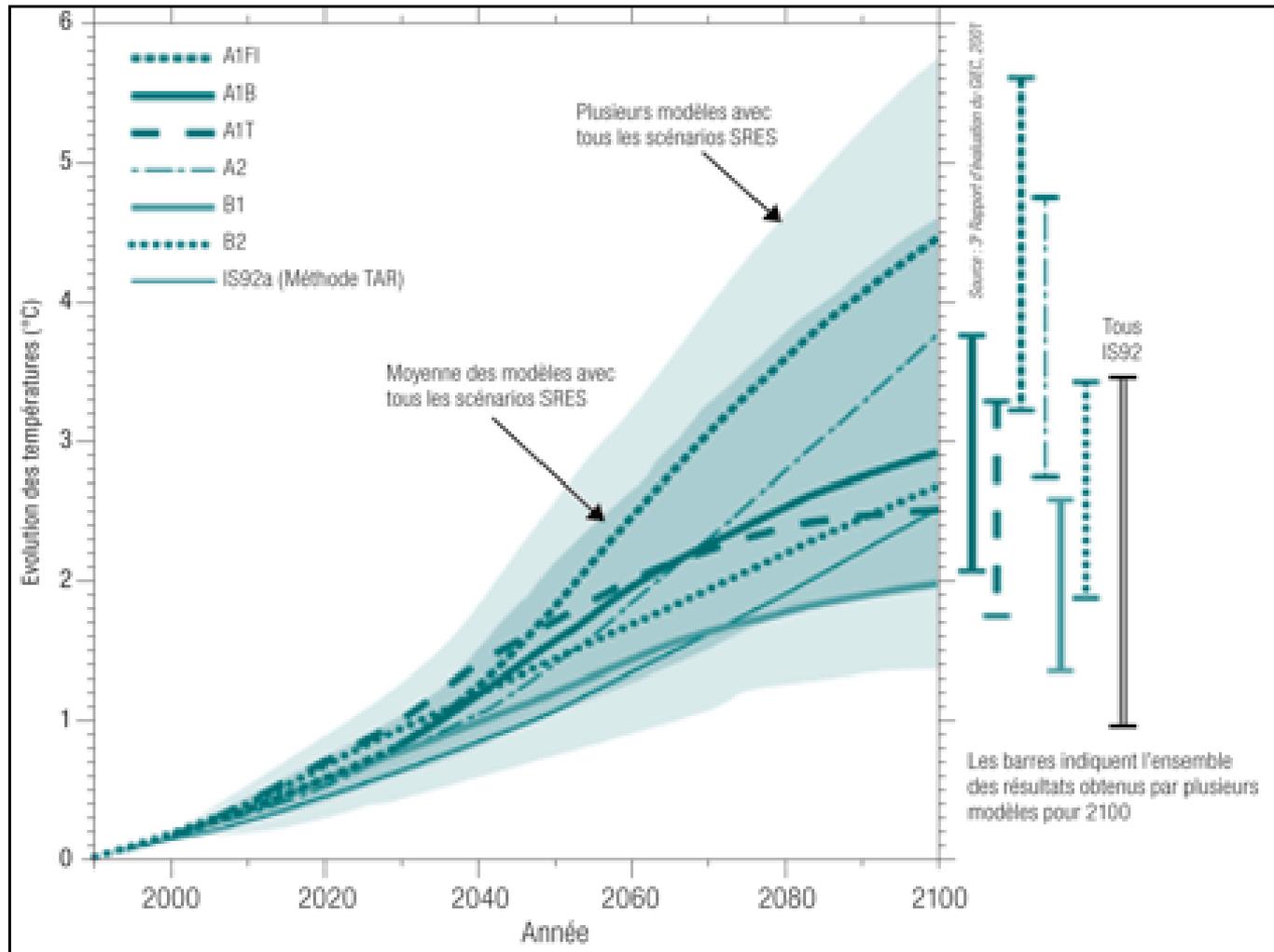
GRAPHIC DESIGN : PHILIPPE REKACEMCZ



Source : International Energy Agency, 1996.

L'américain consomme 4 fois plus d'énergie que la moyenne mondiale et l'europpéen 2 fois plus.

# Evolutions possibles de la température



## Les effets possibles du réchauffement climatique



Possibles effets d'un réchauffement climatique (Projection 2050 - 2100)

Dossier d'actualité en ligne de La Documentation française

Source : GIEC Climate change, 2001

© La Documentation française

# Les énergies renouvelables

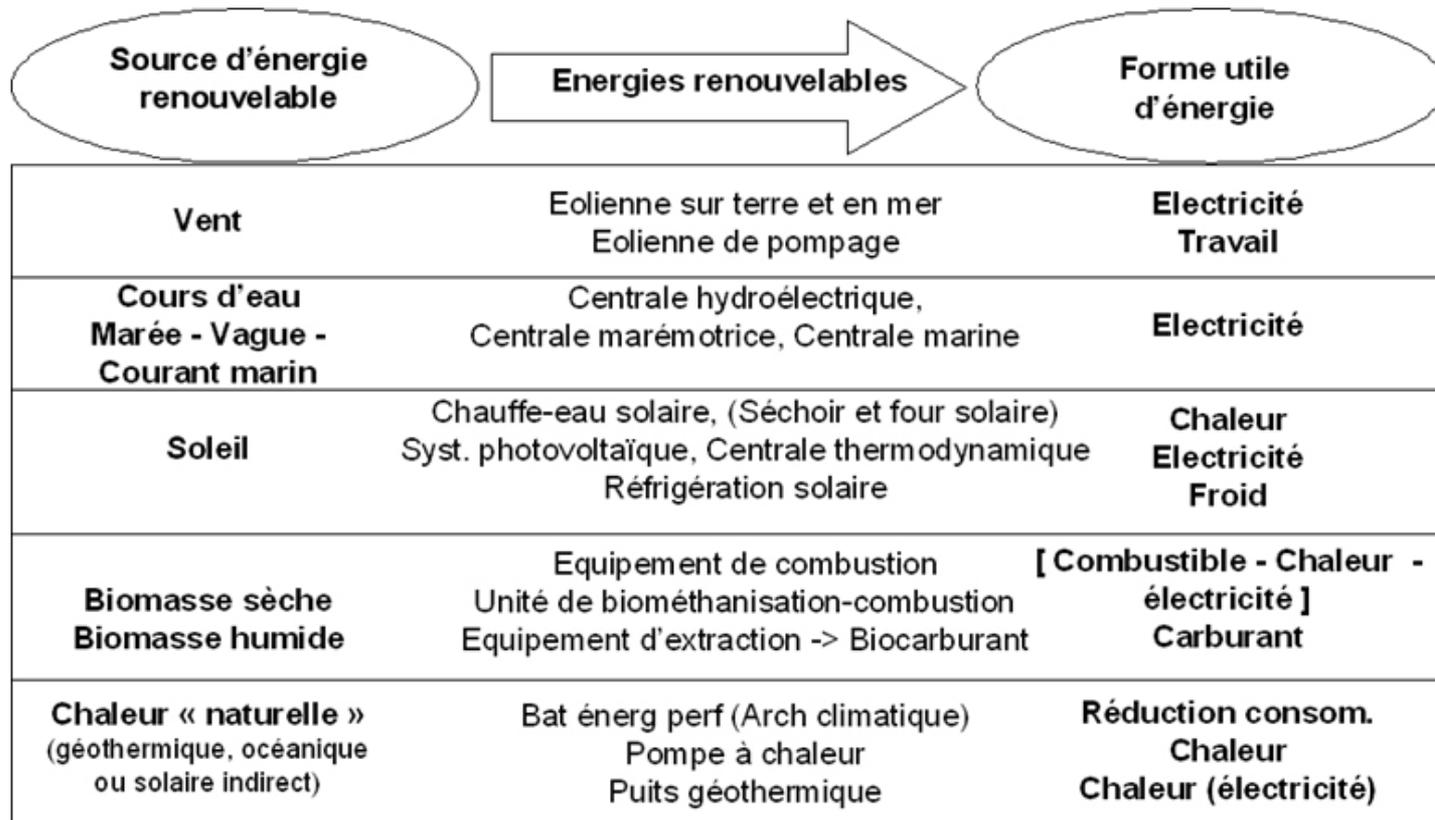




Il est impératif de préserver la planète. Un changement profond de nos habitudes et le développement des énergies renouvelables doivent être des priorités.

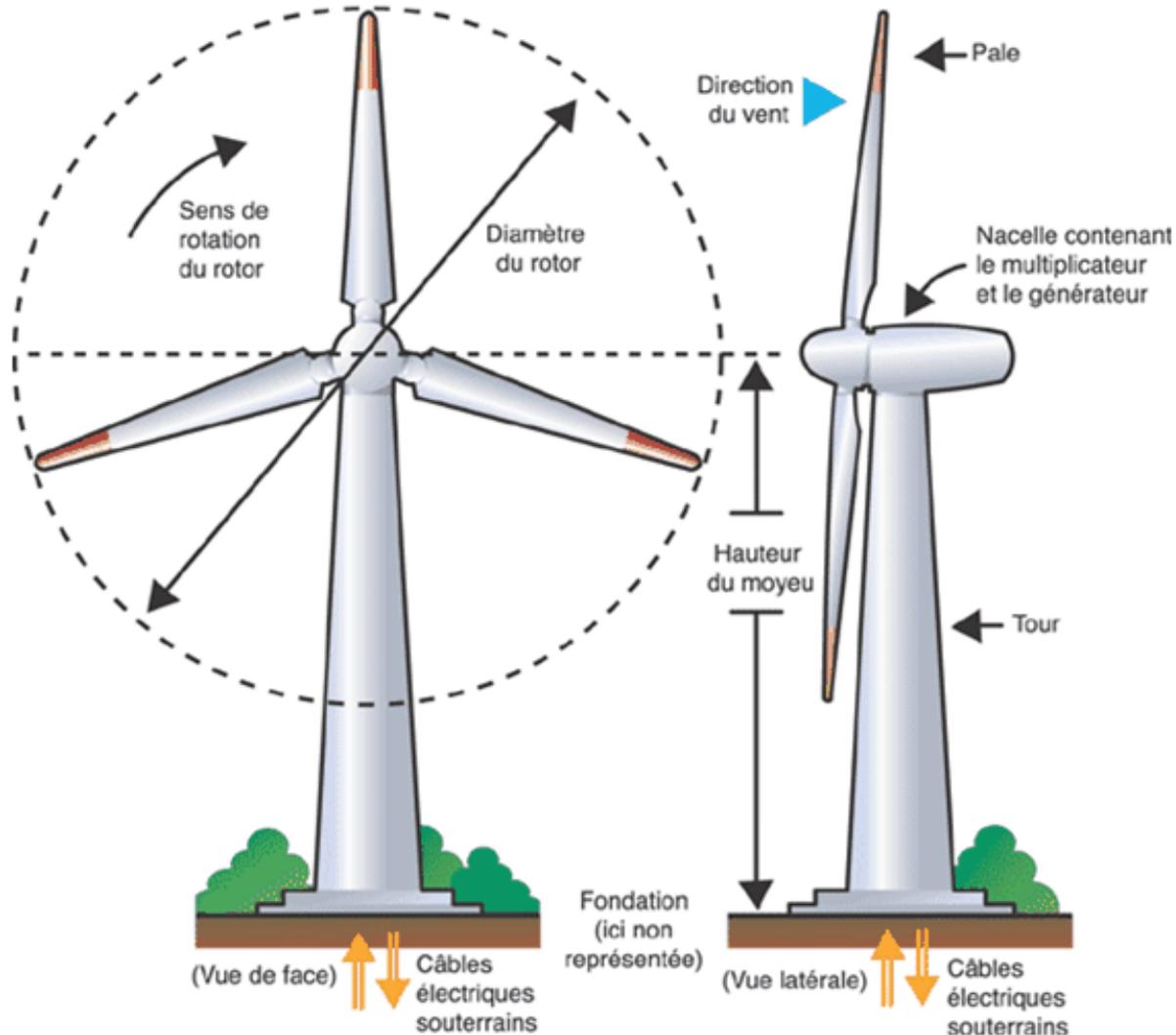


# Les énergies renouvelables.



Nous parlerons uniquement de l'énergie éolienne comme exemple.

# Schémas d'ensemble d'une éolienne

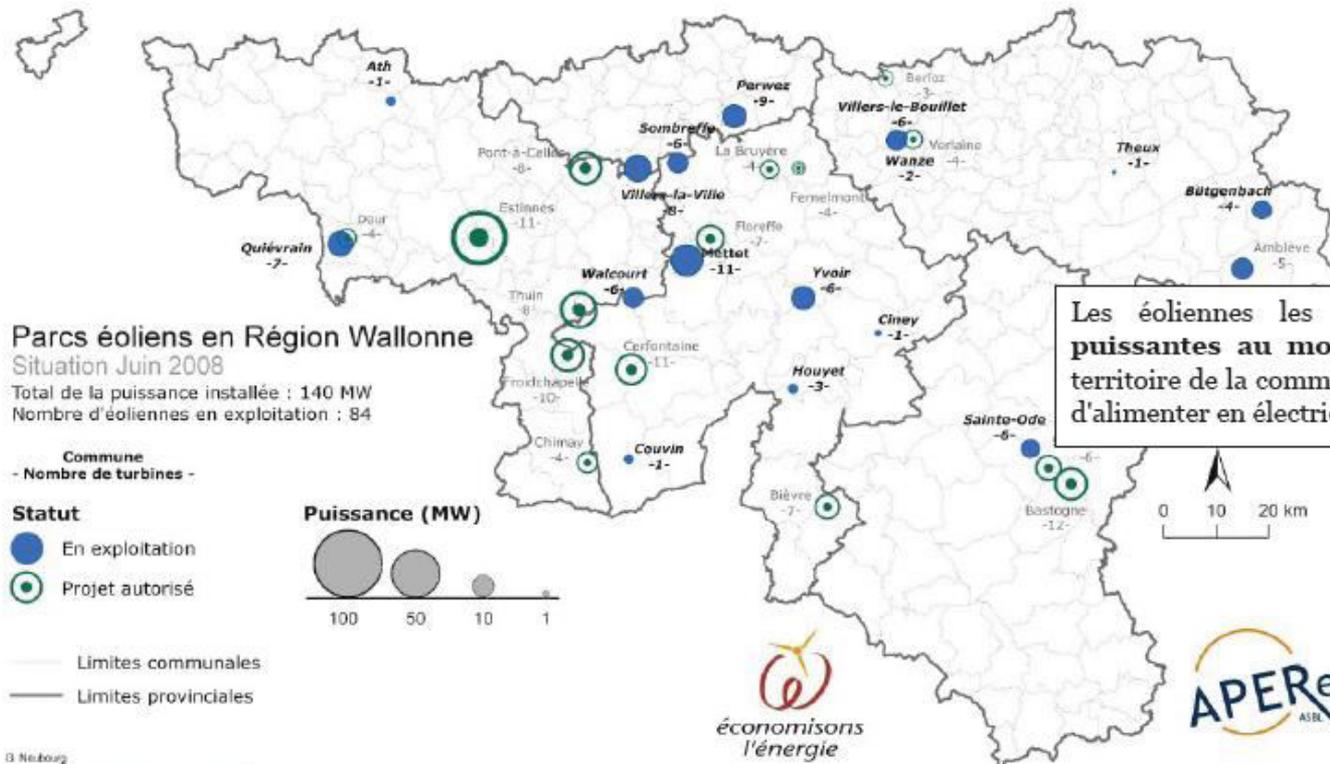




La Wallonie ne manque pas de souffle



La vitesse moyenne du vent en Wallonie se situe autour de 5,5 mètres/seconde (20 km/h), ce qui permet une **production très efficace** : les éoliennes tournent **plus de 80% du temps**.



Les éoliennes les **plus hautes** et les **plus puissantes au monde** seront construites sur le territoire de la commune d'**Estinnes** et permettront d'alimenter en électricité environ 50 000 ménages.

© Neubourg



« Allons en vent... »

Grâce à un financement européen et régional, l'asbl **Vents d'Houyet** a permis la construction, à Mesnil-L'Eglise, d'une seconde éolienne. Magnifique exemple d'initiative citoyenne, puisque cette **éolienne** a la rare particularité d'appartenir... **à des enfants** !



Parc d'éoliennes à Zeebrugge

## Remplacer le pétrole ?

Aujourd'hui, la consommation totale de pétrole au niveau mondial est égale à environ 30 milliards de barils par an (1 baril = 159 l). Le pétrole consommé annuellement au niveau mondial fournit environ une énergie de  $1,6 \times 10^{20}$  Joules. Cela correspond à une puissance de  $5,1 \times 10^{12}$  Watts.

### Question d'unités...

La combustion de 1 litre de pétrole fournit une énergie d'environ 33 MJ. En supposant que la masse volumique du pétrole soit de 0,8 kg/l, cela équivaut à  $33/0,8 = 41,25$  MJ/kg ou 41,25 GJ/tonne. Ce qui correspond à l'unité standard du monde pétrolier : 1 tep (tonne-équivalent pétrole) = 41,87 GJ.

Si l'on devait faire appel à une source alternative pour fournir cette quantité d'énergie, il faudrait :

- soit **5100 réacteurs nucléaires** de 1 GW (pour 450 actuellement);
- soit **5,1 millions d'éoliennes** de 1 MW. En Belgique, le rendement est voisin de 20%. Si toutes les éoliennes fonctionnaient avec le même rendement, il en faudrait 5 fois plus, occupant une superficie d'environ 250 000 km<sup>2</sup>, correspondant à plus de 8 fois la superficie de la Belgique;
- soit **280 barrages** hydro-électriques géants (tel l'ouvrage des Trois Gorges, en Chine);
- soit environ **220 000 km<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques**;
- soit environ **3,3 millions de km<sup>2</sup> de surfaces cultivées pour la biomasse**, ce qui correspond à un peu moins que la superficie de l'Union européenne des 25 ou encore une centaine de fois la Belgique.



Il n'y a donc **pas de solution miracle pour résoudre les problèmes du déclin**. La sortie du pétrole se fera via une combinaison de solutions : économies d'énergie, développement de solutions alternatives (énergie et matière première) et changement du mode de vie.

# Et le nucléaire?

Il y a ceux qui sont pour et ceux qui sont contre.



La discussion est vive. Essayons d'y voir un peu plus clair.

# Le nucléaire peut-il apporter une réponse adéquate?

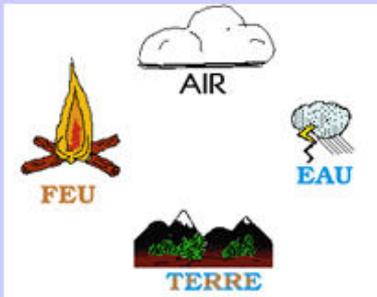
Pour donner des éléments de réponse, nous allons étudier

- Qu'est-ce que l'atome?
- Qu'est-ce que la radioactivité?
- Quelles sont les risques?
- Quelles sont les avantages et les inconvénients?
- Comment fonctionne une centrale nucléaire?



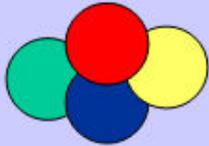
# L'atome

## Etude des constituants les plus ténus de la matière et de leurs interactions



VI<sup>ème</sup> et V<sup>ème</sup> siècle av. J.C.

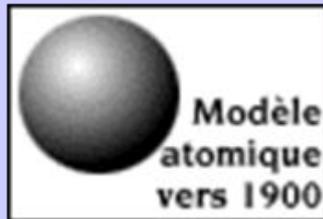
Thalès et Anaximène



V<sup>ème</sup> siècle av. J.C.

Leucippe et Démocrite

atomes: ατομος

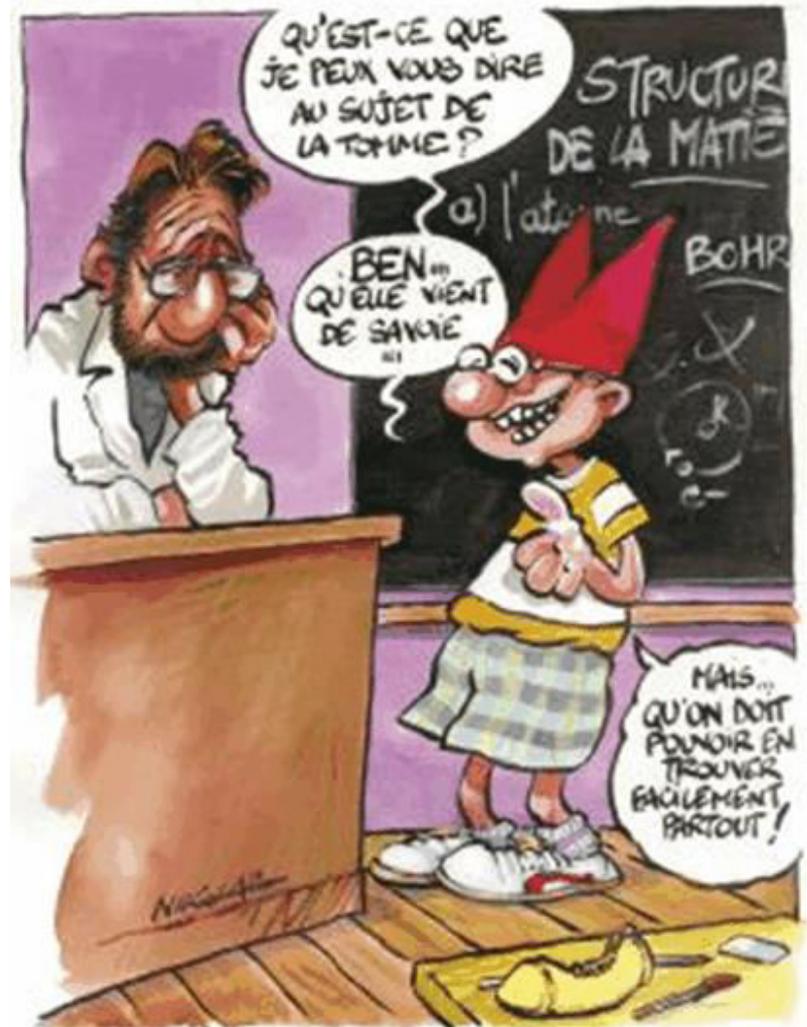


XIX<sup>ème</sup> siècle

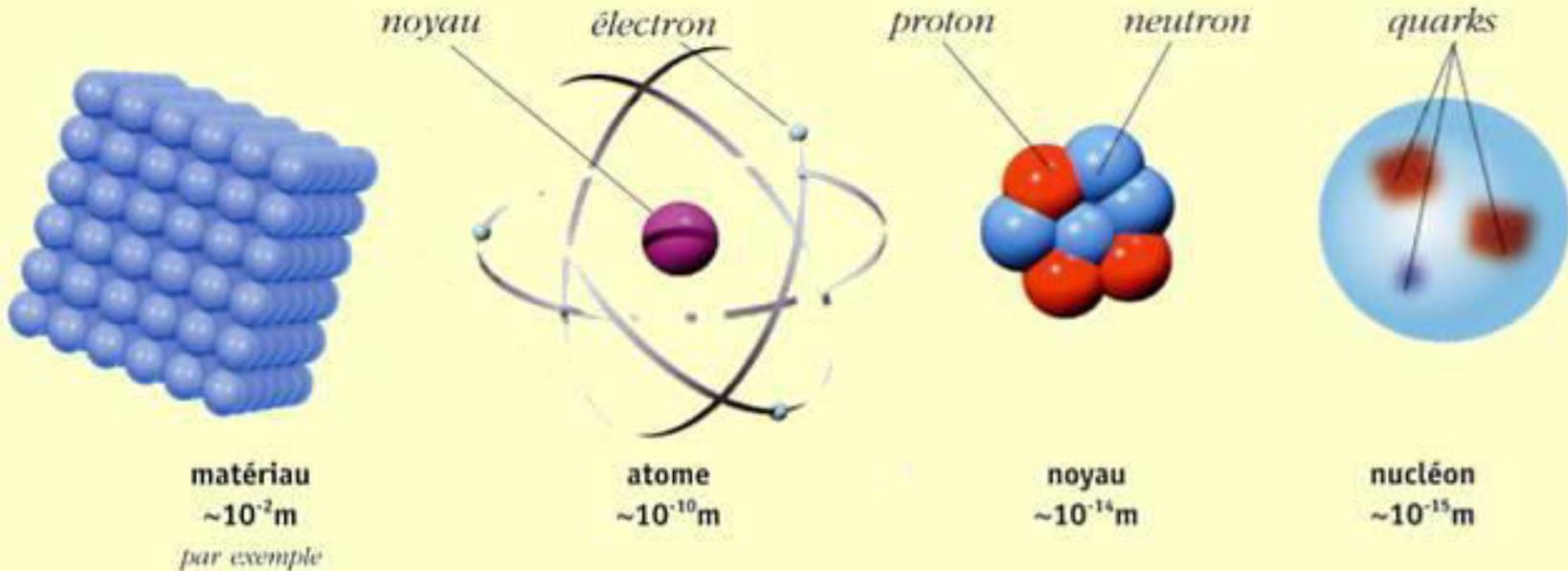
J. Dalton: théorie atomique

D.I. Mendeleïev: tableau

périodique



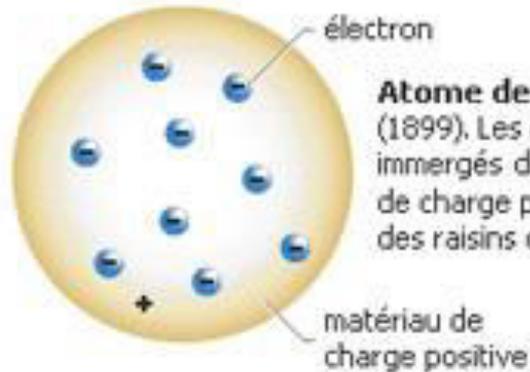
## LA STRUCTURE DE LA MATIÈRE



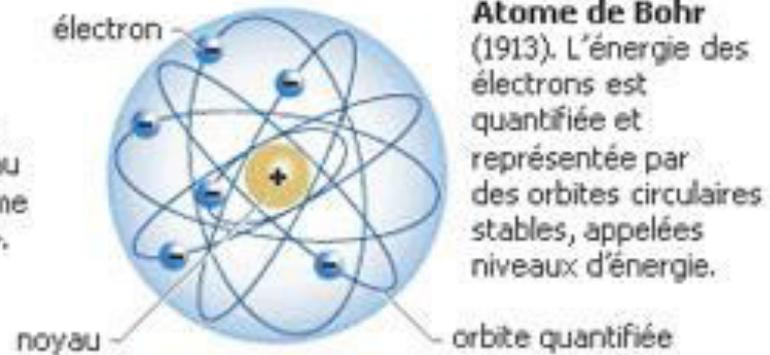
**Niels BOHR** nait a Copenhague le 7 Octobre 1885. De 1913 a 1915, il élabore, a partir du modèle atomique de Rutherford, la première vision quantique de l'atome: un modèle ou les orbites des électrons autour du noyau atomique sont quantifiées: un atome ne peut émettre ou absorber de la lumière qu'en faisant passer un électron d'une orbite quantique à une autre. Il reçoit le prix Nobel de physique en 1922. Il meurt a Copenhague le 18 Novembre 1962.



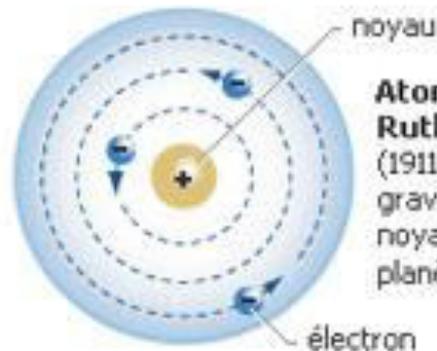
# Les modèles d'atome



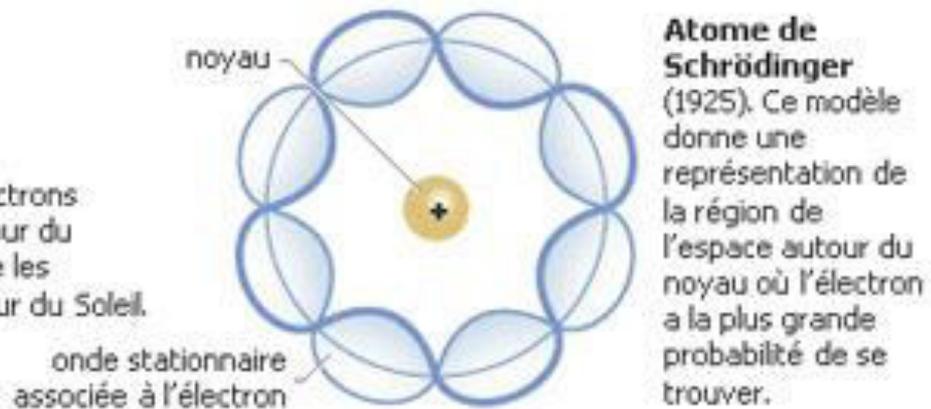
**Atome de Thomson**  
(1899). Les électrons sont immergés dans un matériau de charge positive, « comme des raisins dans un cake ».



**Atome de Bohr**  
(1913). L'énergie des électrons est quantifiée et représentée par des orbites circulaires stables, appelées niveaux d'énergie.



**Atome de Rutherford**  
(1911). Les électrons gravitent autour du noyau, comme les planètes autour du Soleil.



**Atome de Schrödinger**  
(1925). Ce modèle donne une représentation de la région de l'espace autour du noyau où l'électron a la plus grande probabilité de se trouver.

# Masse des atomes

Masse du neutron:	$1,675 \times 10^{-27}$ kg
Masse du proton:	$1,673 \times 10^{-27}$ kg
Masse de l'électron:	$9,1 \times 10^{-31}$ kg

Les neutrons et protons sont donc environ 2000 fois plus lourds que les électrons.

**La masse de l'atome est presque totalement concentrée dans le noyau.**

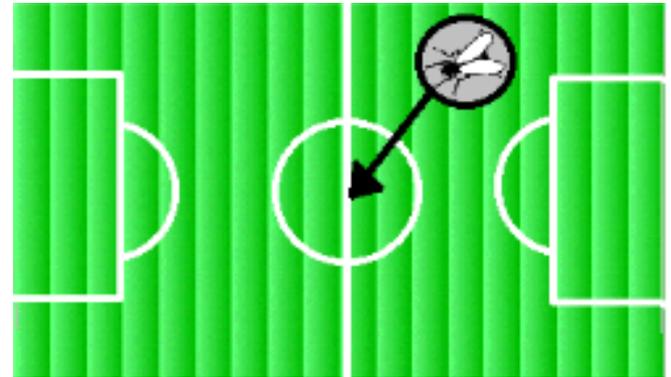
# Dimension des atomes

Diamètre de l'atome:	environ $10^{-10}$ m
Diamètre du plus gros noyau:	environ $10^{-14}$ m

Le plus gros noyau est environ 10.000 fois plus petit que l'atome.

Comme une mouche (1 cm) au centre d'un terrain de football (100 m).

**Un noyau est donc pratiquement rempli de vide.**



Une mole de matière ( $7 \text{ cm}^3$  de Fe) contient  $6 \cdot 10^{23}$  atomes (ou molécules).

**Peut-être plus que le nombre de grains de sable sur la Terre !!**

# Le noyau

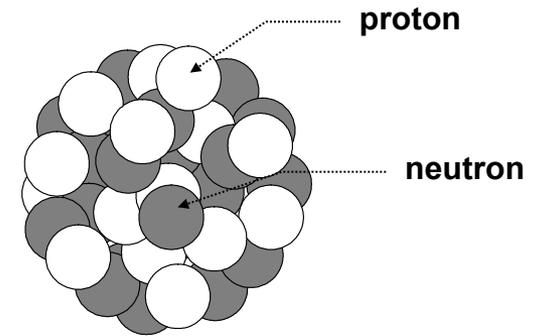
Le noyau est constitué de **nucléons**:

les protons et les neutrons

- **Z** est le nombre de protons (**nombre atomique**)
- **N** le nombre de neutrons
- **A** le nombre de nucléons (**nombre de masse**)

$$A = N + Z$$

Un noyau comportant un nombre donné de protons de neutrons s'appelle **un nucléide**.



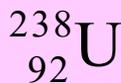
La **notation standard** d'un noyau indique le symbole chimique (X), Z et A:

( Z peut être omis )



Noyau de carbone 14 comportant:

14 nucléons: 6 protons et 8 neutrons.



Noyau d'uranium 238 comportant:

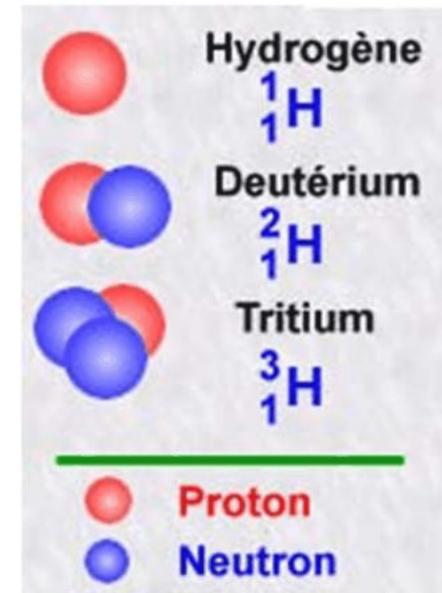
238 nucléons: 92 protons et 146 neutrons.

# Les isotopes



- En physique nucléaire et en chimie, deux atomes sont dits **isotopes** s'ils ont le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent.
- Le nombre de protons dans le noyau d'un atome est désigné par le numéro atomique **Z**. Ce qui distingue deux isotopes est qu'ils ont une masse atomique **A** différente.
- La masse atomique d'un atome est le nombre de nucléons que contient le noyau de cet atome. La différence de masse atomique est donc due à une différence dans le nombre de neutrons **N**.
- Les **propriétés chimiques** des isotopes d'un même élément sont identiques car ces isotopes ont le même nombre d'électrons (et de protons).

$$A = Z + N$$



# Les isotopes

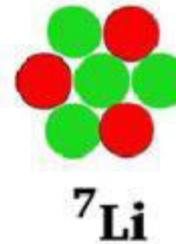
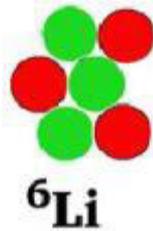
**Hydrogen**  
**1 proton**



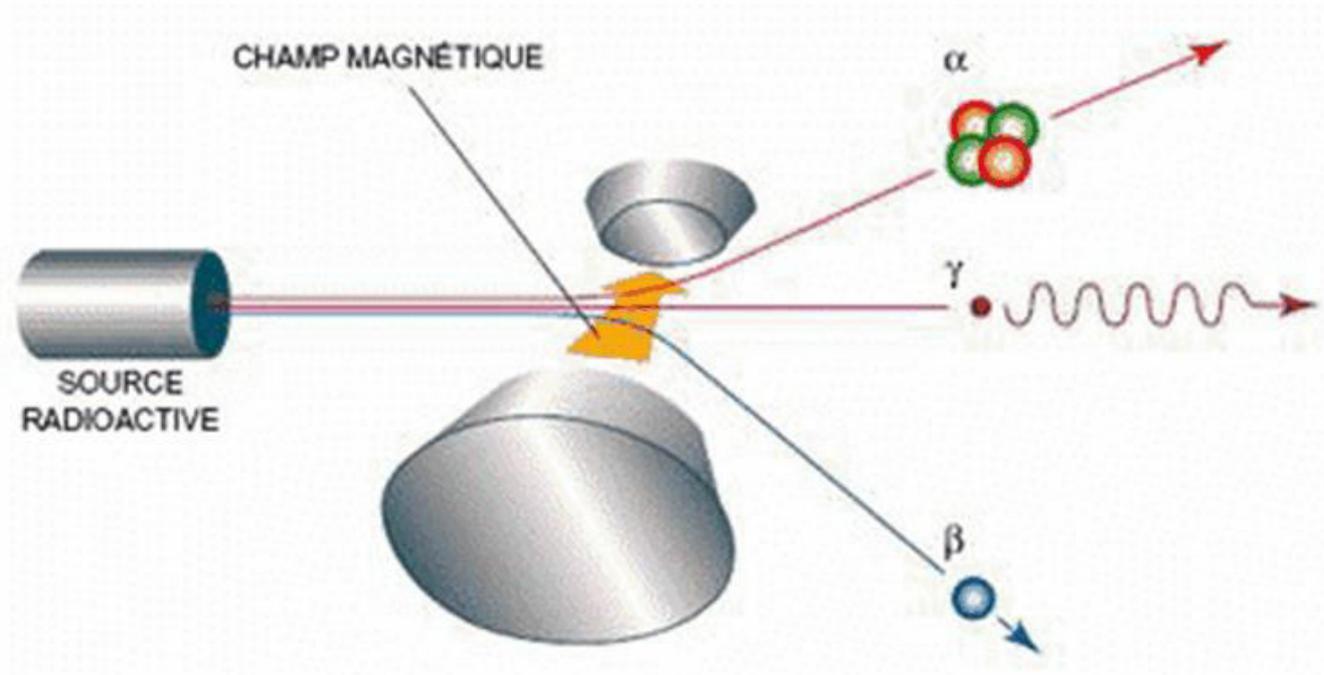
**Helium**  
**2 protons**



**Lithium**  
**3 protons**



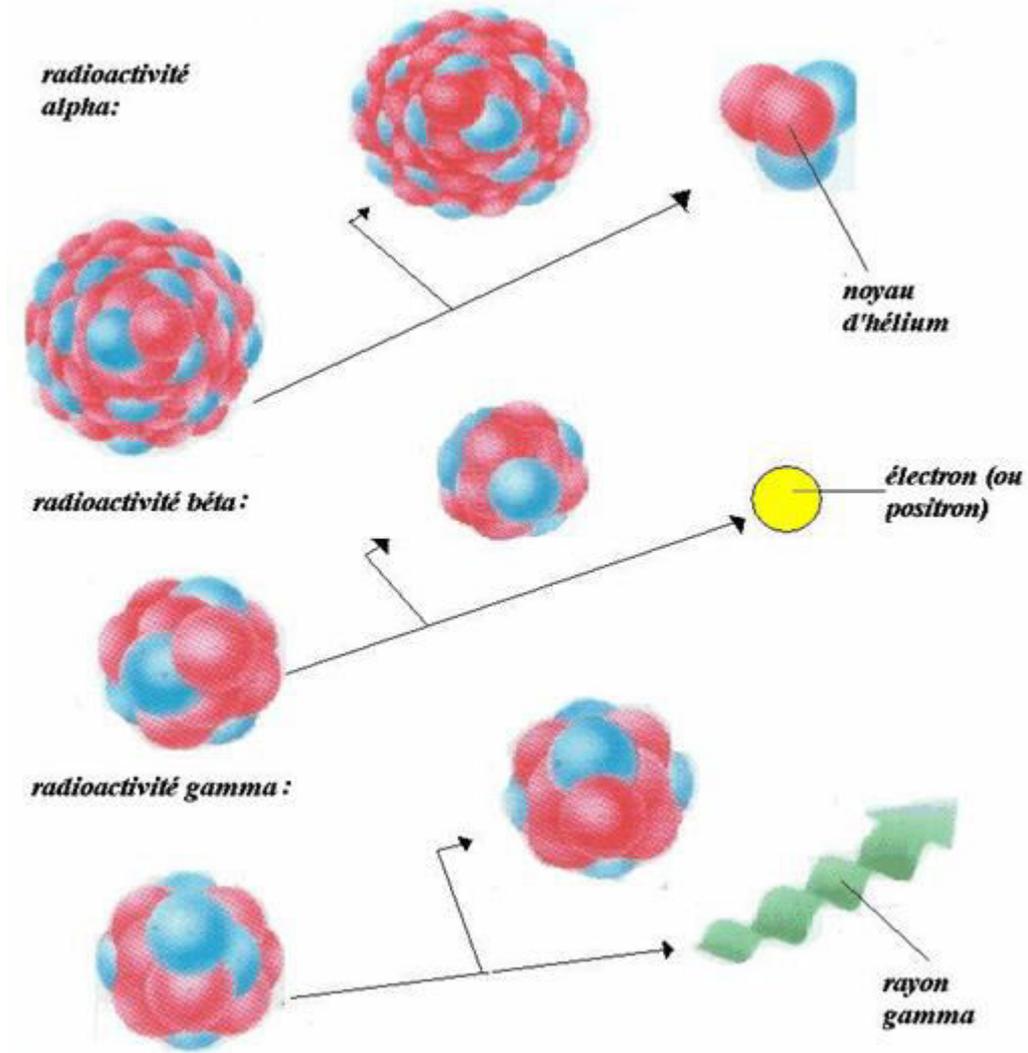
# La radioactivité



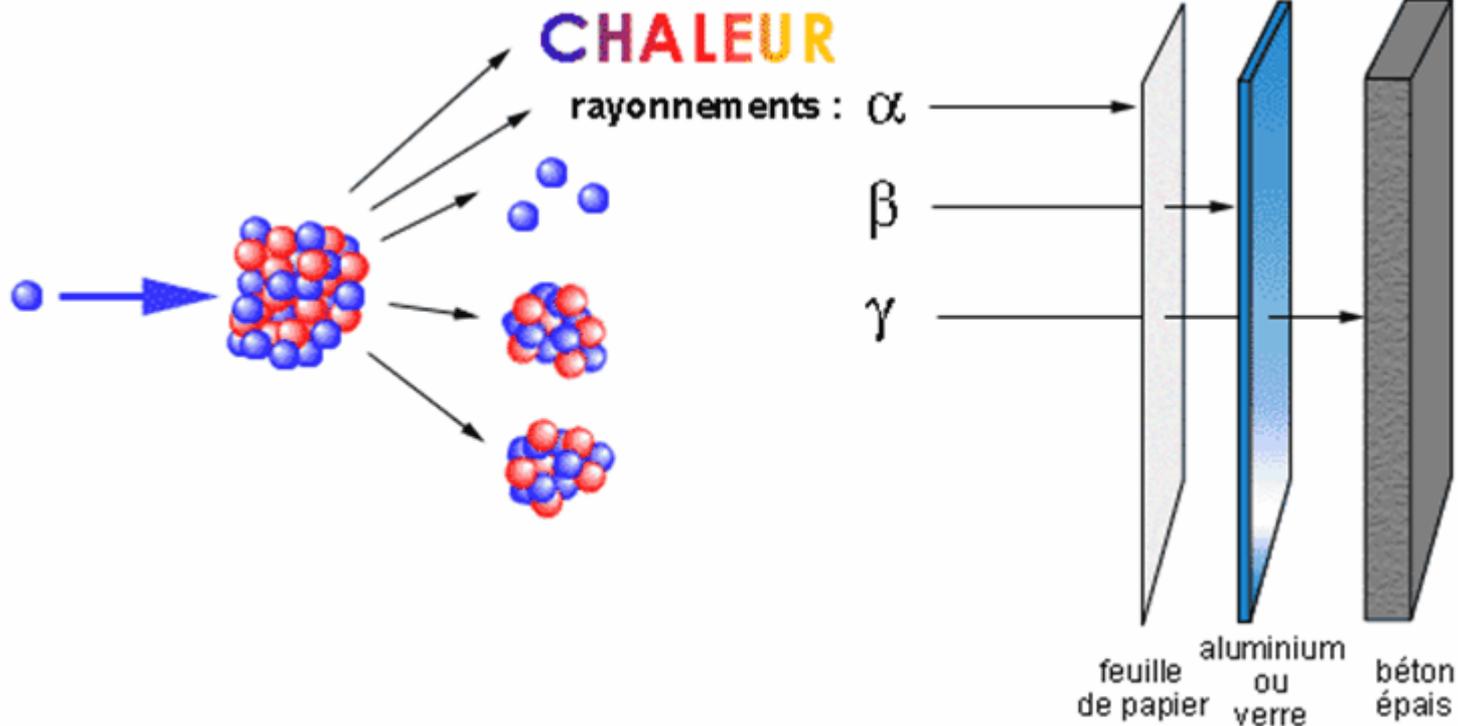
**Antoine Henri Becquerel**, physicien français, (1852 – 1908) . En 1896, Becquerel découvrit la radioactivité par accident, alors qu'il faisait des recherches sur la fluorescence des sels d'uranium



# Les rayonnements



# Les rayonnements



Rayonnements émis lors d'une fission

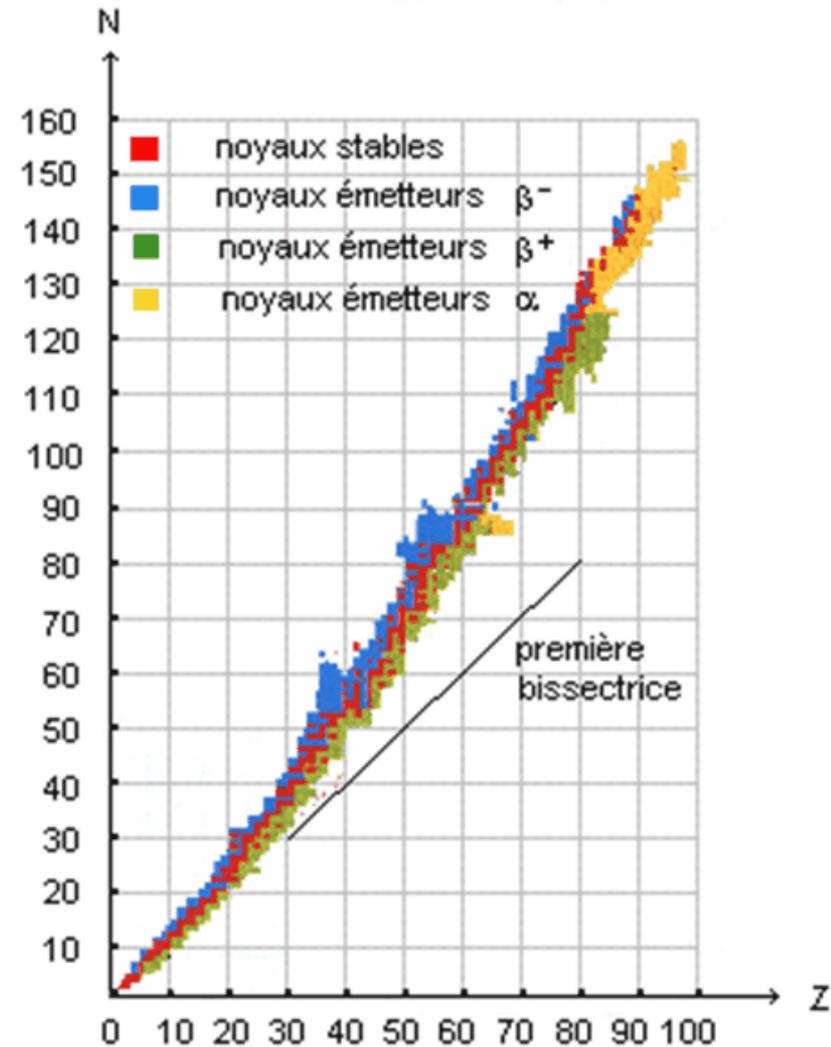
# Les rayonnements

Nature	Vitesse	Masse au repos	Energie	Risques	Protection
$\alpha$	10000 à 20000 km/s	$m_{\alpha}=7300 m_e$	2 à 9 MeV	Relativement peu dangereux. Pouvoir d'ionisation très élevé. Dégâts en surface.	Arrêtés par une feuille de papier ou 3 cm d'air.
$\beta$	60000 à 270000 km/s	$m_e=9.1 \cdot 10^{-31} \text{kg}$	0.01 à 13 MeV	Dangereux. Pouvoir d'ionisation moindre. Pénétration élevée.	Arrêtés par 2 mm d'aluminium ou 3 m d'air.
$\gamma$	300000 km/s	0	0.04 à 10 MeV	Très dangereux car très pénétrants. Dégâts internes.	2 à 5 cm de plomb ou 1 à 2 m de béton.

$$1 \text{ J} = 6,25 \cdot 10^{12} \text{ MeV}$$

# Stabilité des isotopes

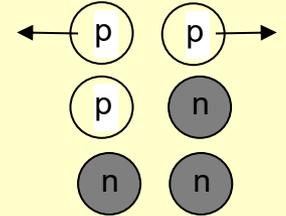
1. Le nombre de neutrons augmente plus vite que le nombre de proton. Dans un diagramme (N,Z), les éléments sont donc situés au-dessus de la première bissectrice.
2. Les neutrons jouent le rôle de « ciment » entre les protons qui ont tendances à se repousser par répulsion coulombienne. Cependant, ce « ciment » n'est efficace que dans certains rapports nombre de protons/nombre de neutrons et aussi pour autant que le noyau ne soit pas trop gros.
3. Il y a donc seulement une partie des isotopes qui sont stables. Les autres vont se désintégrer jusqu'à obtenir une structure stable.



# Les forces à l'intérieur du noyau

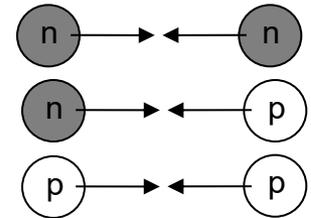
## La force électrique:

- Force répulsive qui s'exerce entre les **protons**.
- Les neutrons ne sont pas soumis à cette force.
- Sa portée est très grande, elle s'exerce entre tous les protons d'un noyau.



## La force nucléaire:

- Force attractive qui s'exerce entre tous les nucléons.
- Cette force attractive est beaucoup plus grande que la force électrique répulsive.
- Elle assure la cohésion du noyau.
- Sa portée est faible: au-delà de  $4 \cdot 10^{-15}$  m ( moins que le diamètre d'un gros noyau) elle n'agit plus.



## A l'intérieur d'un noyau ces deux forces sont en compétition.

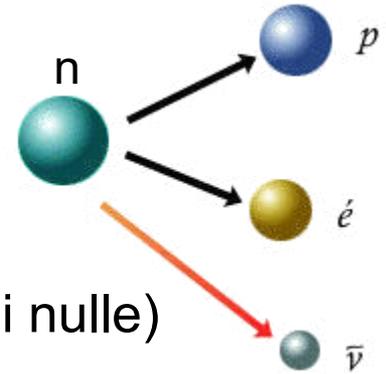
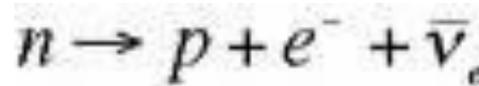
- Entre protons voisins, la force nucléaire attractive l'emporte.
- Entre protons éloignés, la force électrique répulsive l'emporte.
- Les neutrons insensibles à la force électrique renforcent la cohésion du noyau.

# Le problème du neutron

Le neutron **isolé** est une particule **instable**.

Au bout de quelques minutes il se désintègre en:

- Un proton
- Un électron
- Un neutrino (petite particule neutre de masse quasi nulle)



A l'intérieur d'un noyau, le neutron devient stable grâce à la présence des protons en place, car il n'a pas l'énergie suffisante pour fabriquer un nouveau proton soumis aux forces répulsives des autres.

Cependant si les neutrons sont trop nombreux dans le noyau, certains d'entre eux peuvent perdre cette protection et se désintégrer à l'intérieur du noyau.

- Le proton formé reste dans le noyau.
- L'électron est éjecté à grande vitesse: c'est la **radioactivité bêta** ( $\beta$ ).
- Le neutrino est éjecté.

# La stabilité du noyau

- La cohésion d'un noyau est assurée par la **force nucléaire** qui s'exerce entre nucléons.
- Cette force s'exerce entre nucléons voisins, sa portée est faible.
- Pour des protons assez distants à l'intérieur du noyau, c'est la force de répulsion électrique qui l'emporte.
- A cause de cette force, **des noyaux trop gros ne peuvent subsister.**

## **La présence de neutrons à l'intérieur d'un noyau contribue à le stabiliser.**

- Les neutrons exercent une force d'attraction sur des nucléons voisins
- Ils ne sont pas soumis à la répulsion électrique des protons « éloignés ».
- Plus le noyau est gros, plus la proportion de neutrons doit être grande.

$^{12}_6\text{C}$

carbone-12:

6 protons, 6 neutrons (50 % de neutrons)

$^{56}_{26}\text{Fe}$

fer-56:

26 protons, 30 neutrons (54 % de neutrons)

$^{207}_{82}\text{Pb}$

plomb-207:

82 protons, 125 neutrons (60 % de neutrons)

**Au-delà de Z=84 (Bismuth) tous les noyaux sont instables.**

# La stabilité du noyau

Les neutrons, instables quand ils sont isolés, sont stables dans le noyau, grâce au voisinage des protons,

**à condition que leur proportion par rapport aux protons ne soit pas trop grande.**

**Les noyaux ayant trop de neutrons sont instables.**

# La radioactivité : théorie (I)

La radioactivité est un mécanisme **spontané** par lequel les nuclides instables se rapprochent de la zone stable en émettant trois types de particules.

1. Des noyaux d'hélium 4 (**particules  $\alpha$** )

2. Des électrons (**particules  $\beta^-$** ) et des positrons (particules  $\beta^+$ ) – Les positrons sont des électrons positifs.

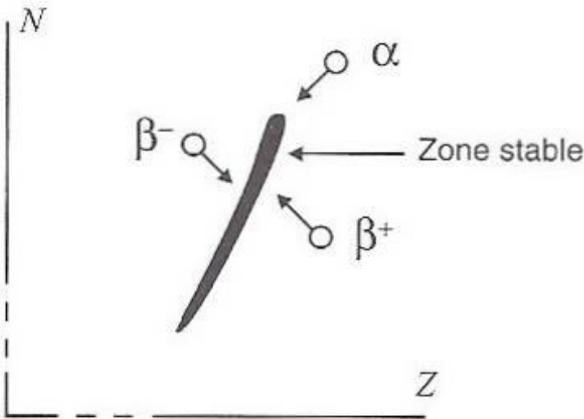
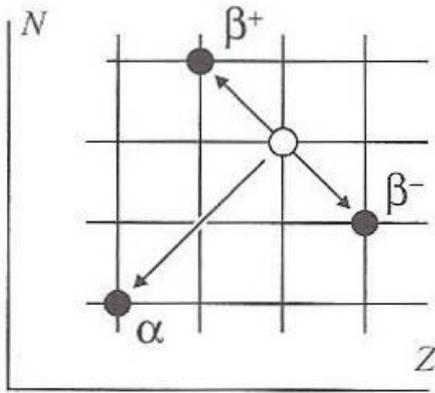
3. Des photons d'énergie élevée, généralement supérieure à celle des photons X. (**particules  $\gamma$** )

# La radioactivité : théorie (II)

La radioactivité permet aux nuclides instables de se rapprocher de la zone stable.

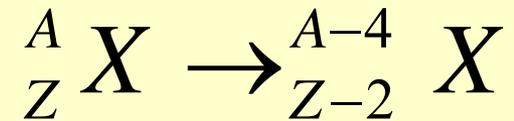
- Un nuclide lourd, fragilisé par sa charge totale réduit celle-ci en expulsant une particule  $\alpha$ ,
- Un nuclide fragilisé par un excès de neutrons transforme un neutron en proton avec expulsion d'un électron (rayonnement  $\beta^-$ ),
- Un nuclide fragilisé par un excès de protons transforme un proton en neutron avec expulsion d'un positron (rayonnement  $\beta^+$ ).

# La radioactivité théorie (III)

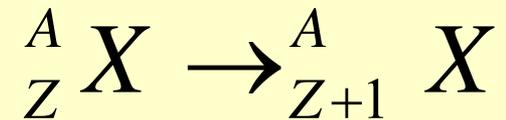


○ Nuclide s'approchant de la zone stable

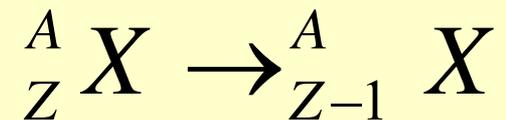
## Radioactivité alpha



## Radioactivité bêta<sup>-</sup>



## Radioactivité bêta<sup>+</sup>

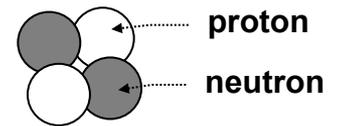


# La radioactivité alpha ( $\alpha$ )

Elle est produite par les noyaux qui sont instables parce qu'ils sont trop gros ( $Z > 84$ )

Le rayonnement  $\alpha$  est constitué d'une particule formée de **2 protons** et de **2 neutrons** ( ${}^4_2\text{He}$ )

Elle est éjectée du noyau.



Une particule  $\alpha$

Vitesse de la particule  $\alpha$  : entre 10.000 et 20.000 km/s



# La radioactivité bêta ( $\beta$ )

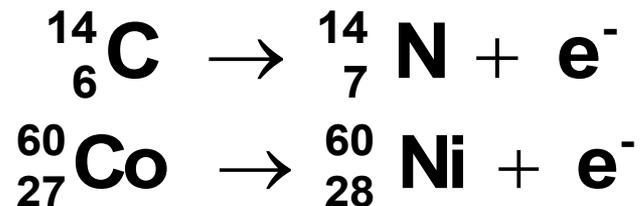
Elle est produite par les noyaux qui sont instables parce qu'ils ont un ou plusieurs **neutrons en excès**.

Un neutron en excès se transforme en:

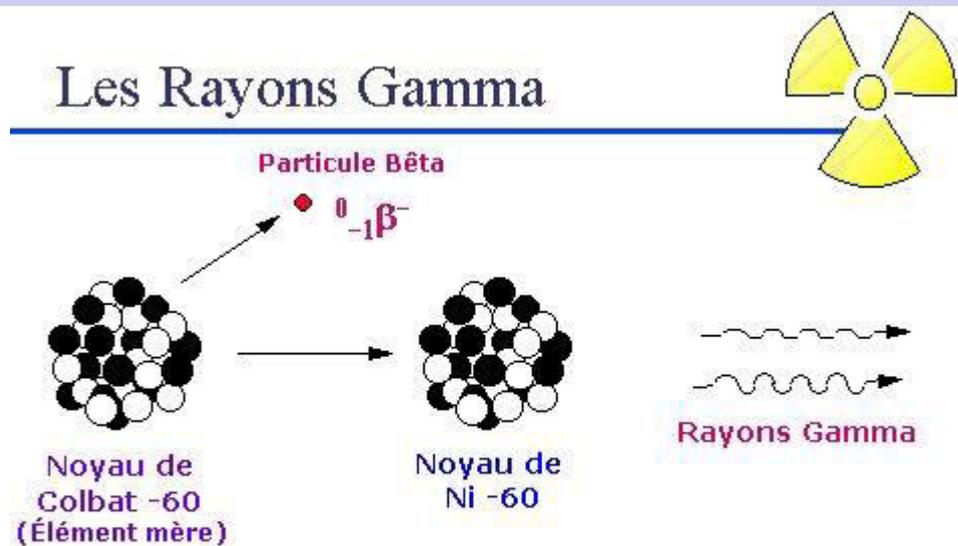
- Un **proton** qui reste dans le noyau.
- Un **électron** qui est éjecté du noyau.

Le rayonnement  $\beta$  est constitué d' **un électron**.

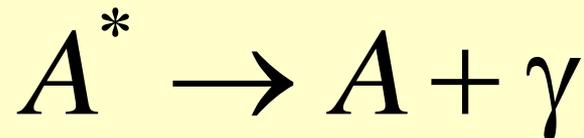
Vitesse de la particule  $\beta$  : plus de 270.000 km/s.



# La radioactivité gamma

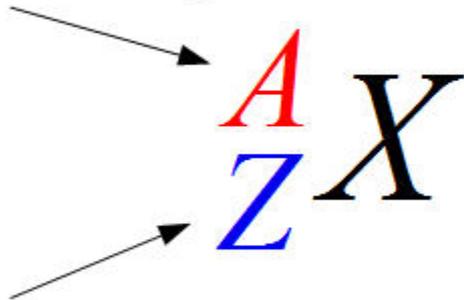


La radioactivité gamma est constituée de photons (comme la lumière) visible, mais ces photons sont très énergétiques : un million de fois plus que les rayons X durs. Ils sont produits quand les noyaux sont dans un état surexcités (comme après une émission bêta) et qu'ils émettent de l'énergie pour revenir à un état plus stable. *Le rayonnement gamma provient donc du noyau.*



# Ecriture des réactions nucléaires

Nombre de nucléons  
= nombre de baryons



Nombre de protons  
= charge électrique

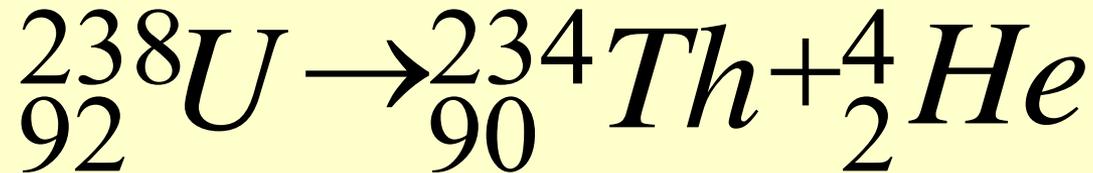
Note : On peut omettre le Z

Dans toute réaction nucléaire, on doit respecter :

1. La conservation du nombre baryonique
2. La conservation de la charge électrique.

# Exemples de réactions nucléaires

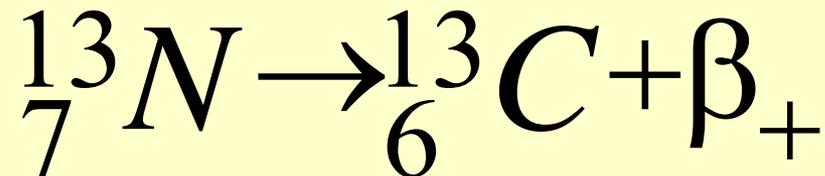
- Radioactivité alpha ( $\alpha$ )



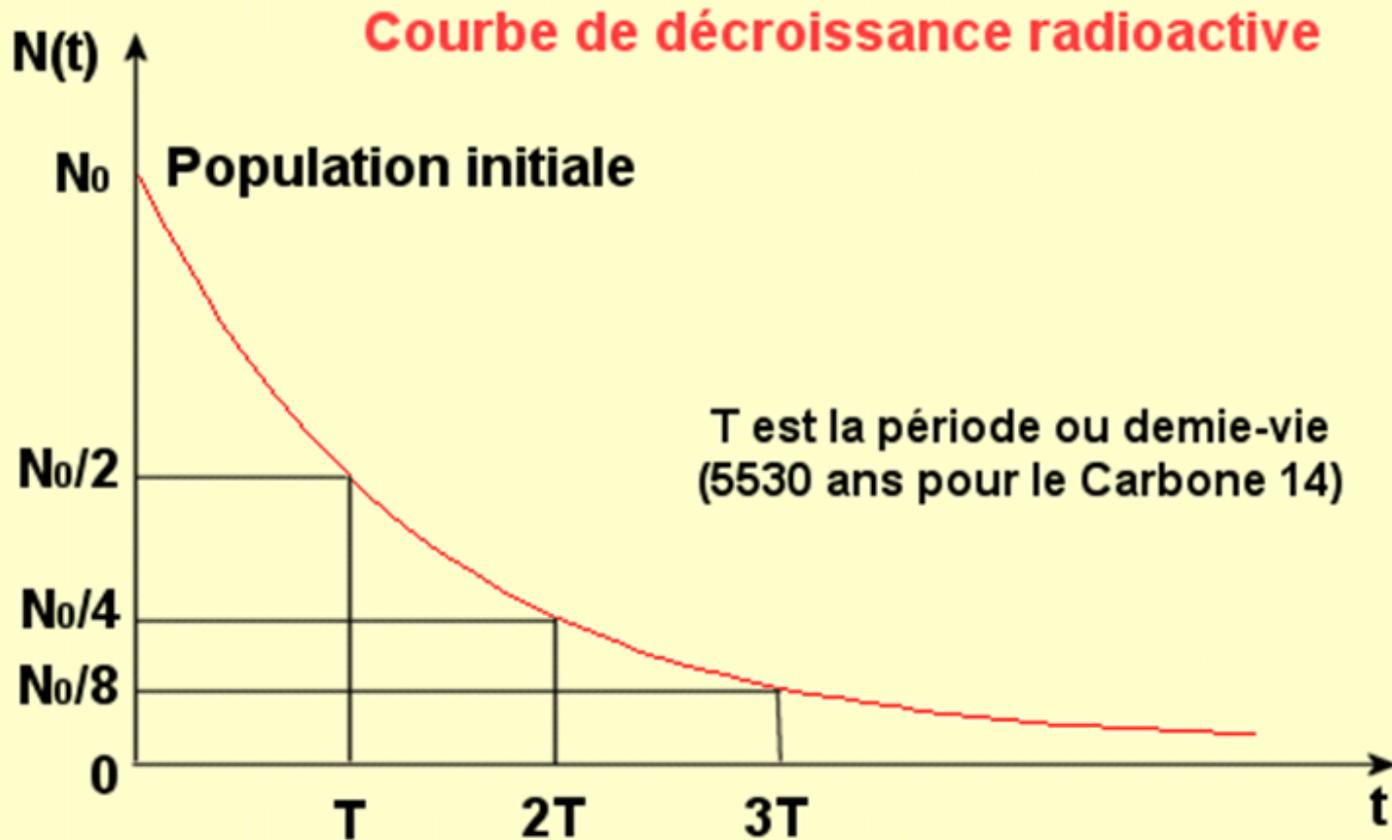
- Radioactivité bêta moins ( $\beta^-$ )



- Radioactivité bêta plus ( $\beta^+$ )



# Demi-vie des isotopes



# Loi de la décroissance.

Soit un corps radioactif composé de  $N$  particules.

Le nombre de désintégration par unité de temps est proportionnel à  $N$  :

$$\frac{dN}{dt} = -kN \Rightarrow \frac{dN}{N} = -kdt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_{t_0}^t kdt$$

$N_0$  est le nombre de particules à l'instant  $t_0 = 0$  et  $N$  à l'instant  $t$

$$\Rightarrow [\ln N]_{N_0}^N = -k [t]_{t_0=0}^t \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -kt \Rightarrow N = N_0 e^{-kt}$$

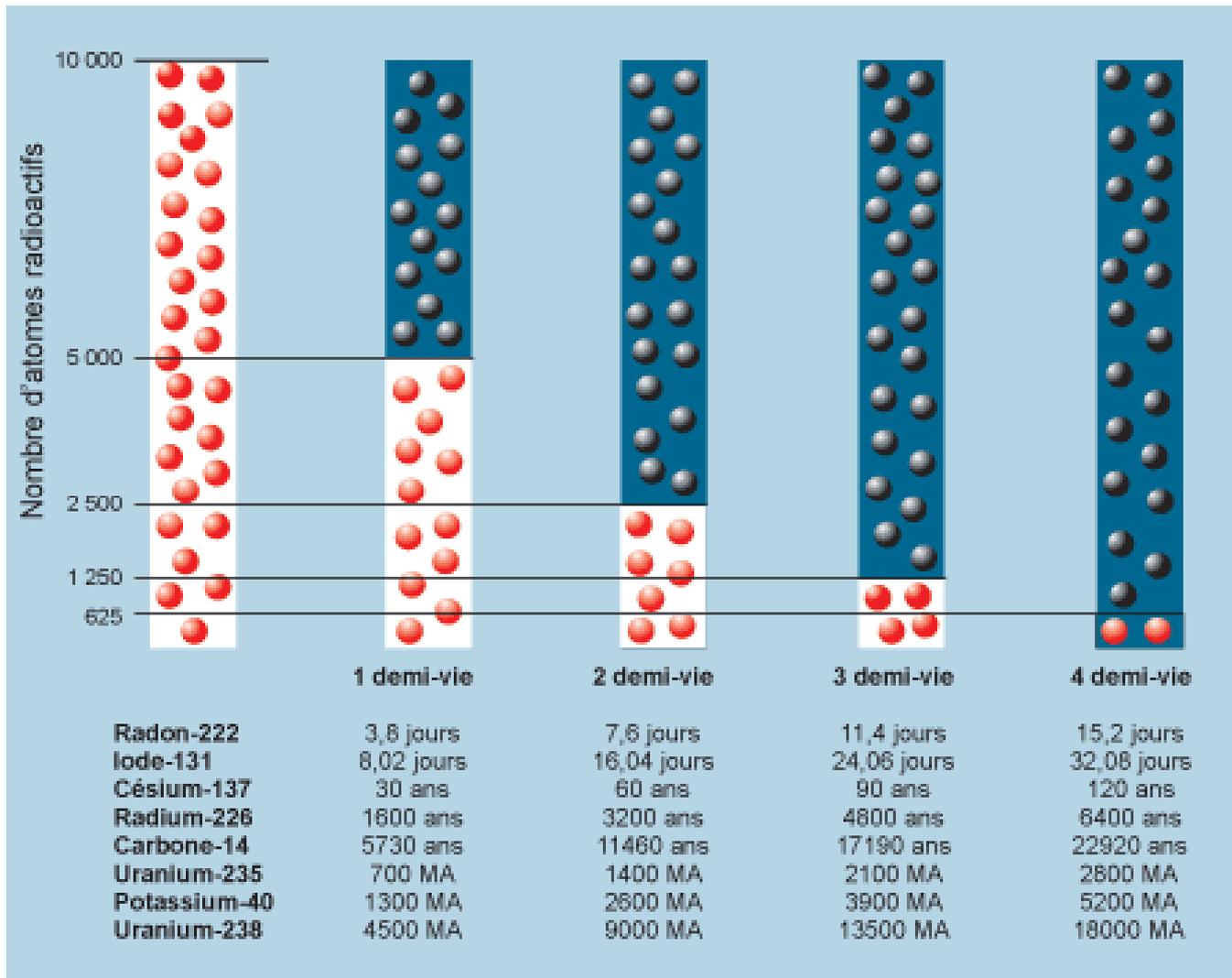
Exprimons la constante  $k$  en fonction de la demi-vie  $T$  :

$$\text{Par définition après } t = T, N = \frac{N_0}{2} \Rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-kT} \Rightarrow -\ln 2 = -kT \Rightarrow k = \frac{\ln 2}{T}$$

Ce qui donne la forme finale de la loi :

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{T} \ln 2} = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

# Demi-vie d'un isotope



# Demi-vie d'un isotope

<b>Radionucléide</b>	<b>Période</b>
Cobalt 60	5.2 ans
Tritium	12.2 ans
Strontium 90	28,1 ans
Césium 137	30 ans
Américium 241	432 ans
Radium 226	1 600 ans
Carbone 14	5 730 ans
Plutonium 239	24 110 ans
Neptunium 237	2 140 000 ans
Uranium 238	4 470 000 000 ans

# Radioactivité :

## Principales unités utilisées.

Grandeurs	Unités	Equivalences	Définitions
Activité	Becquerel (Bq)		Mesure le nombre de désintégrations par seconde au sein d'une matière radioactive.
	Curie (Ci)	1 Ci = 37 milliards de Bq	
Dose absorbée	Gray (Gy)	1Gy = 100 Rd	Mesure de l'énergie reçue par de la matière irradiée par unité de masse.
	Rad (Rd)	1 Rd = 1/100 Gy	
Equivalent de dose	Sievert (Sv)	1 Sv = 100 Rem	Mesure du dégât biologique sur les tissus vivants irradiés.
	Rem	1 rem = 1/100 Sv	
Débit de dose absorbée	Gray par heure (Gy/h ou Gy. H <sup>-1</sup> )	1Gy/h = 100 Rd/h	Quantité d'énergie reçue par la matière par unité de masse et par unité de temps.
	Rad par heure (Rd/h ou Rd.H <sup>-1</sup> )	1 Rd/h = 1/100 Gy/h	
Débit d'équivalent de dose	Sievert par heure (Sv/h ou Sv. H <sup>-1</sup> )	1Sv/H = 100 Rem/h	Dégât biologique subi par un tissu vivant par unité de temps.
	Rem par heure (Rem/h ou Rem H <sup>-1</sup> )	1 Rem/h = 1/100 Sv/h	

# Le Becquerel

## Exemples d'activités (valeurs moyennes)

### Substances radioactives naturelles dans:

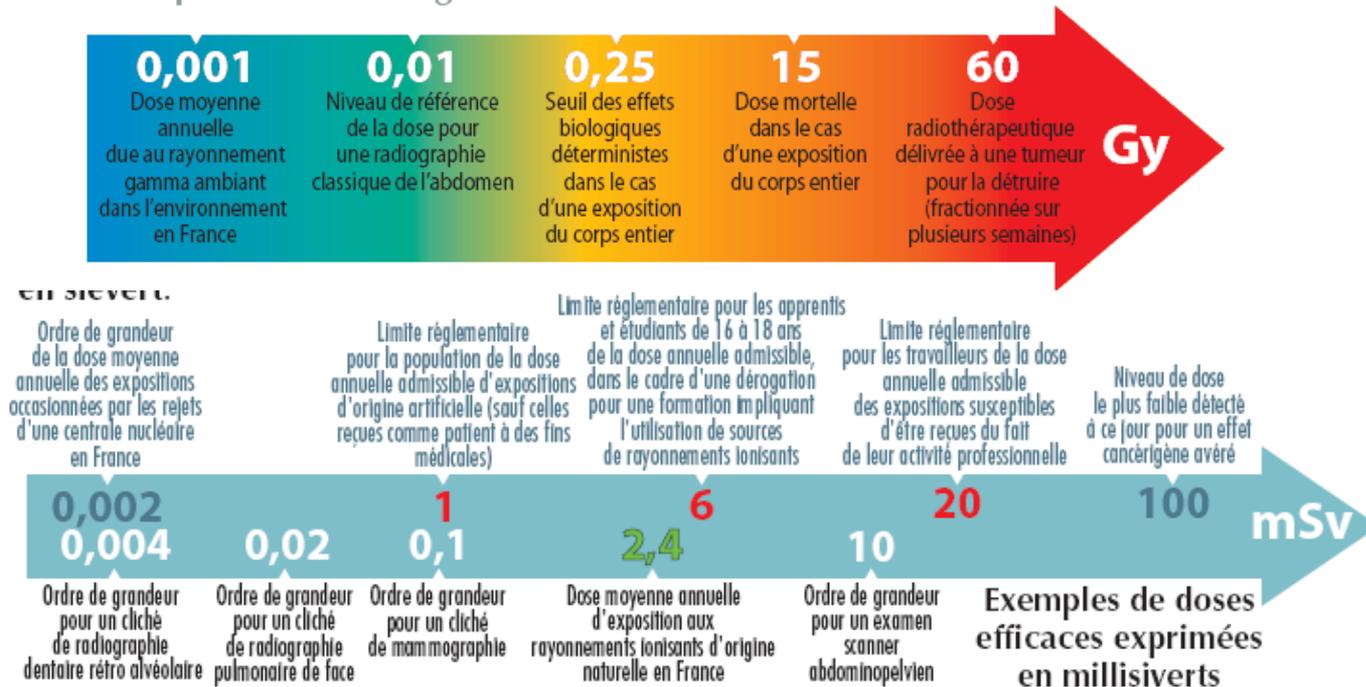
1 kg	Corps humain	130 Bq
1 m <sup>3</sup>	Air de la campagne en Suisse	10 Bq
1 m <sup>3</sup>	Air des lieux d'habitation en Suisse	60 Bq
1 m <sup>3</sup>	Air des galeries de thérapie au radon de Gastein (Autriche)	43 000 Bq
1 kg	Granite du col du Grimsel	3 500 Bq
1 kg	Houille (Saxe)	10 000 Bq
1	Cristal de quartz	1 Bq
1 l	Eau de lacs de montagne	1 Bq
1 l	Eau de mer	10 Bq
1 kg	Foin suisse	1 000 Bq
1 l	Lait	50 Bq
1 kg	Engrais potassique	18 000 Bq
1	Electrode de soudage au thorium	1 000 Bq

### Substances radioactives artificielles dans:

1 kg	Combustible usé provenant de centrale nucléaire	5 000 000 000 000 000 Bq
1	Cadran de bracelet-montre moderne montre moderne	300 000 000 Bq
1	Ancien détecteur d'incendie	50 000 Bq
1	Appareil de contrôle de cordon de soudure	2 000 000 000 000 Bq

# Le Gray et le Sievert

Exemples d'ordres de grandeur de doses absorbées



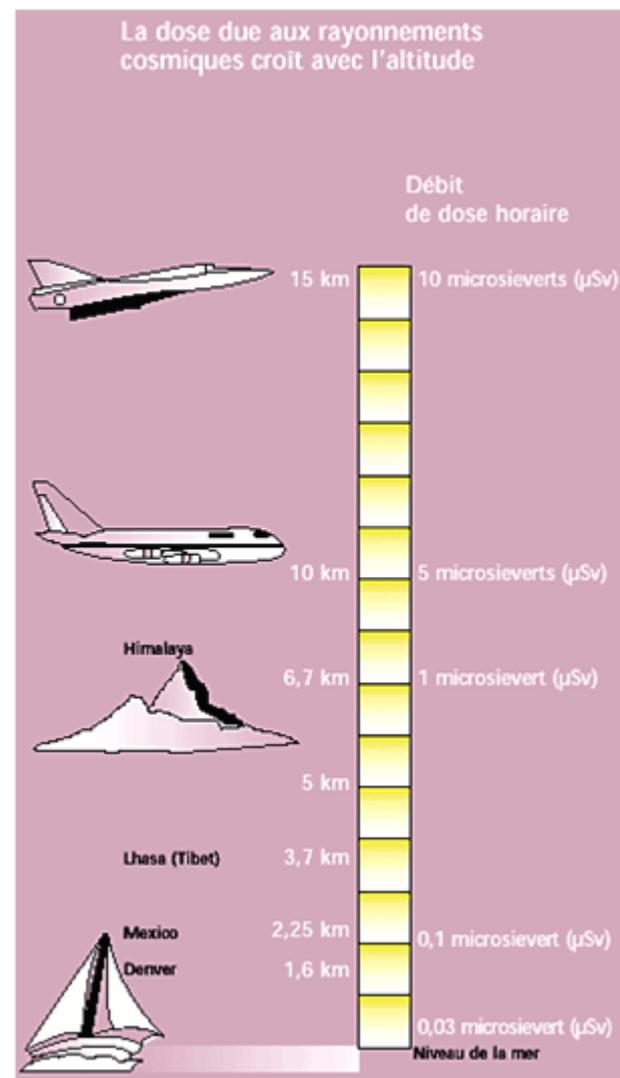
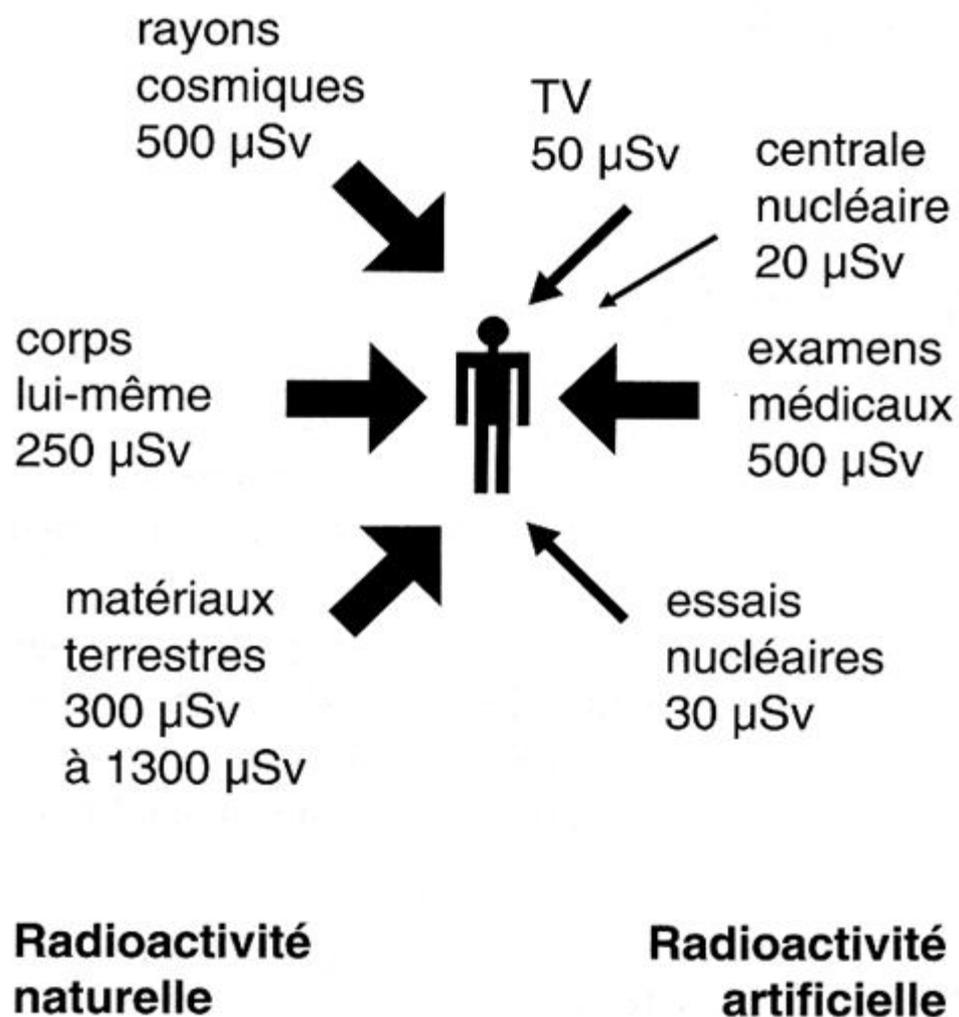
## Dose biologiquement équivalente (DBE)

Les effets physiologiques dépendent de la dose absorbée de la partie du corps irradiée de la durée de l'irradiation de la nature du rayonnement. (par l'intermédiaire du facteur FEB)

FEB = facteur d'efficacité biologique = 20 pour alpha, 1 pour bêta et gamma

DBE = FEB . dose absorbée

DBE en sievert ( Sv) et la dose absorbée en Gray ( Gy) (autre unité: le rem = 0,01 Sv)



# Effets biologiques des rayonnements



- Vomissements
- Perte de cheveux
- Brûlures
- Cancers
- Mutations génétiques
- .....

# Effets des rayonnements

DEB (Sievert)	Effets
0 à 0,25	Aucun effet apparent
1 à 2,5	Troubles digestifs, épilation partielle, fatigue, troubles sanguins, stérilité
2,5 à 4	Nausée, vomissement, 20% de décès dans le mois
au delà de 6	90 % de morts
100	Mort dans les heures qui suivent
1000	Mort dans les minutes qui suivent





# Applications de la radioactivité



## • Médecine, biologie, chimie

- Traitement des tumeurs cancéreuses
- Scintigraphie
- Dosage des éléments à l'état de trace (hormones, insuline,....)
- Stérilisation
- Mécanisme des réactions chimiques

## • Agronomie et agroalimentaire

- Stérilisation et conservation des aliments
- Modification génétique
- Mécanisme de transport

## • Industrie

- Gammagraphie et bétagraphie
- Détecteur incendie
- Contrôle de niveau. Mesure de densité.
- Détection des fuites

## • Art et archéologie

- Datation
- Conservation des œuvres d'art
- Analyse des œuvres d'art

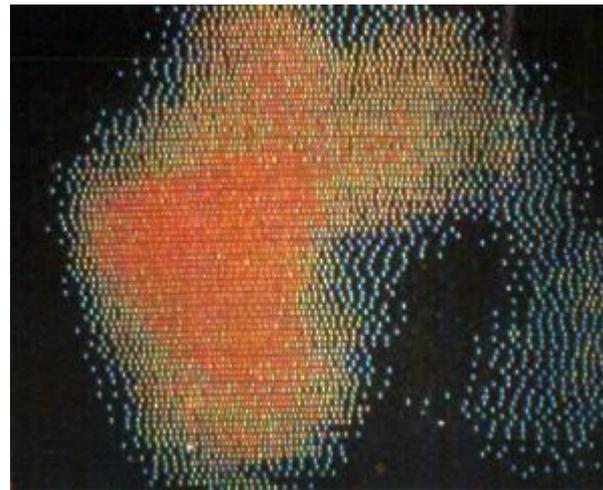
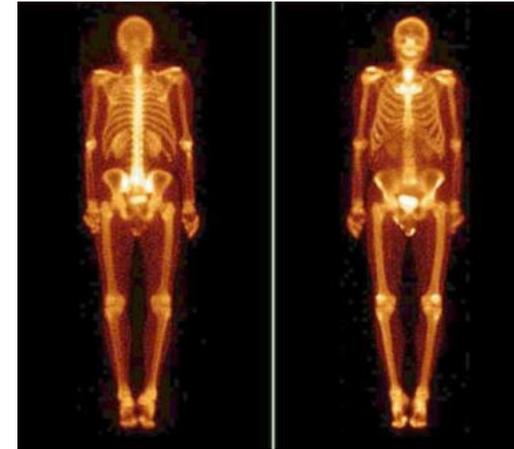
# Applications de la radioactivité

La scintigraphie osseuse a pour but de rechercher une localisation du cancer au niveau des os. Cet examen est pratiqué dans un laboratoire de médecine nucléaire sans hospitalisation. Une substance légèrement radioactive est injectée dans le sang et va se fixer sur le squelette. Une image (cartographie) de tout le squelette permet de détecter les zones de fixation anormales.

## SCINTIGRAPHIE OSSEUSE



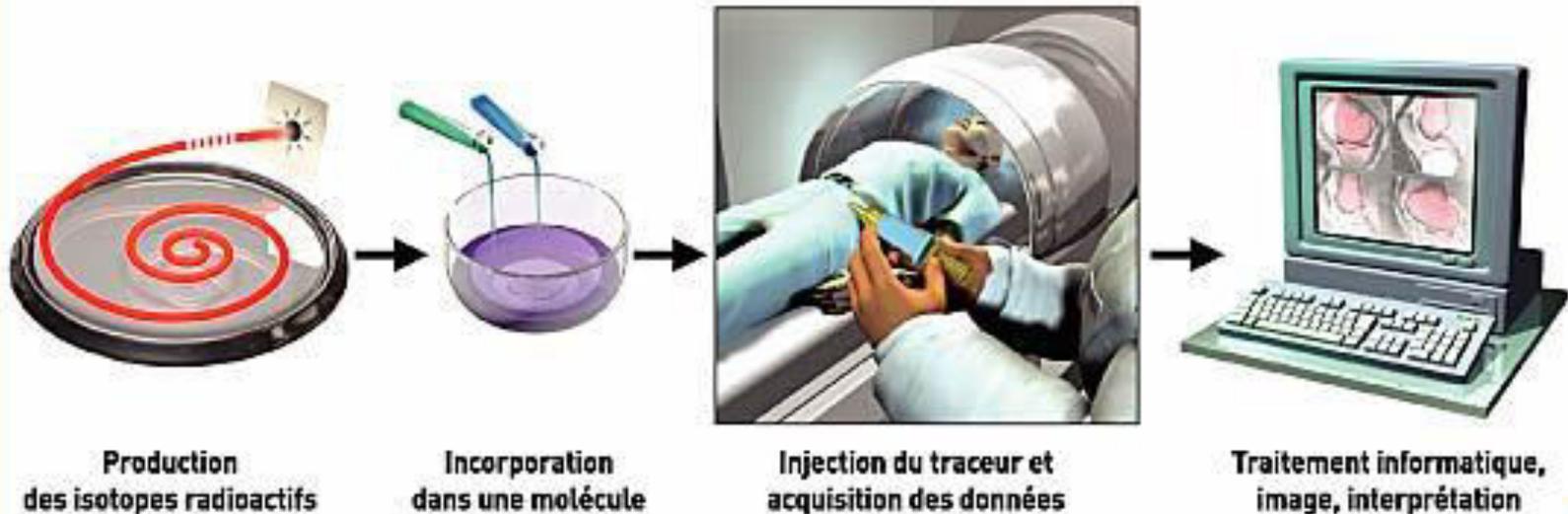
La scintigraphie



Scintigraphie du foie

# Applications de la radioactivité

## Processus de l'imagerie par TEP



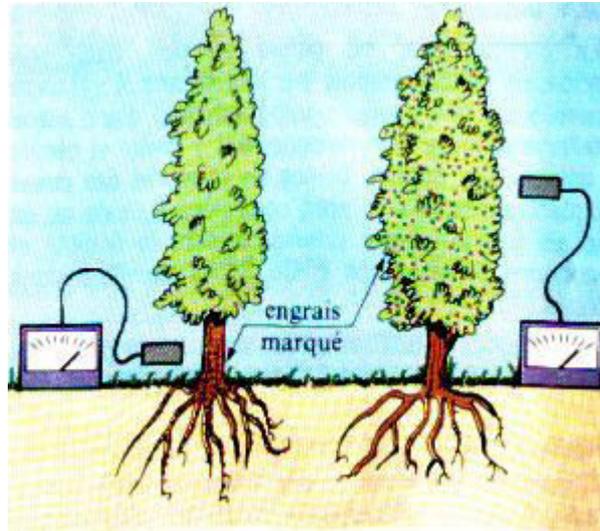
### la tomographie par émission de positons (TEP)

La tomographie par émission de positons fournit aux médecins des diagnostics précoces dans la détection de maladies. La TEP est utilisée en cancérologie, pour les maladies cérébrales (alzheimer, parkinson) et plus généralement dans les sciences cognitives (les mécanismes cérébraux: mémoire, attention, raisonnement).

Contrairement aux isotopes utilisés en scintigraphie comme l'iode 131, les radioéléments émetteurs de positons (rayonnements  $\beta^+$ ) comme l'oxygène, le carbone et l'azote sont abondants dans la matière vivante et par conséquent difficilement incorporables à des molécules.

# Applications de la radioactivité

Etude de l'absorption  
d'un engrais au  
moyen d'un traceur



## Gammagraphie de la statue d'Aphrodite

La gammagraphie de cette statue  
d'Aphrodite du musée du Louvre a  
permis de mettre en évidence les  
consolidations antérieures de la statue  
de marbre, et de situer les inserts  
métalliques et les cavités.

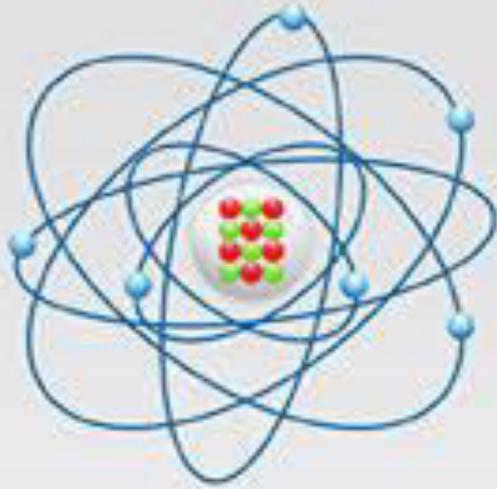


Gammagraphie industrielle.  
Opération de contrôle de  
soudure afin de détecter un  
éventuel défaut

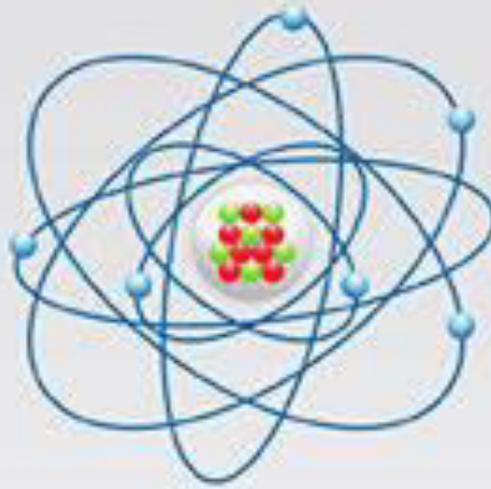


7. Conservation d'objets d'art.  
*Consolidés par polymérisation sous irradiation, ces objets  
deviennent imputrescibles.*

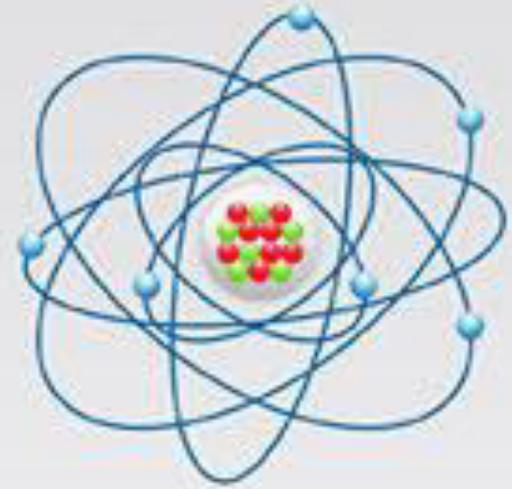
# Datation au carbone 14



**Carbon-12**  
stable



**Carbon-13**  
stable

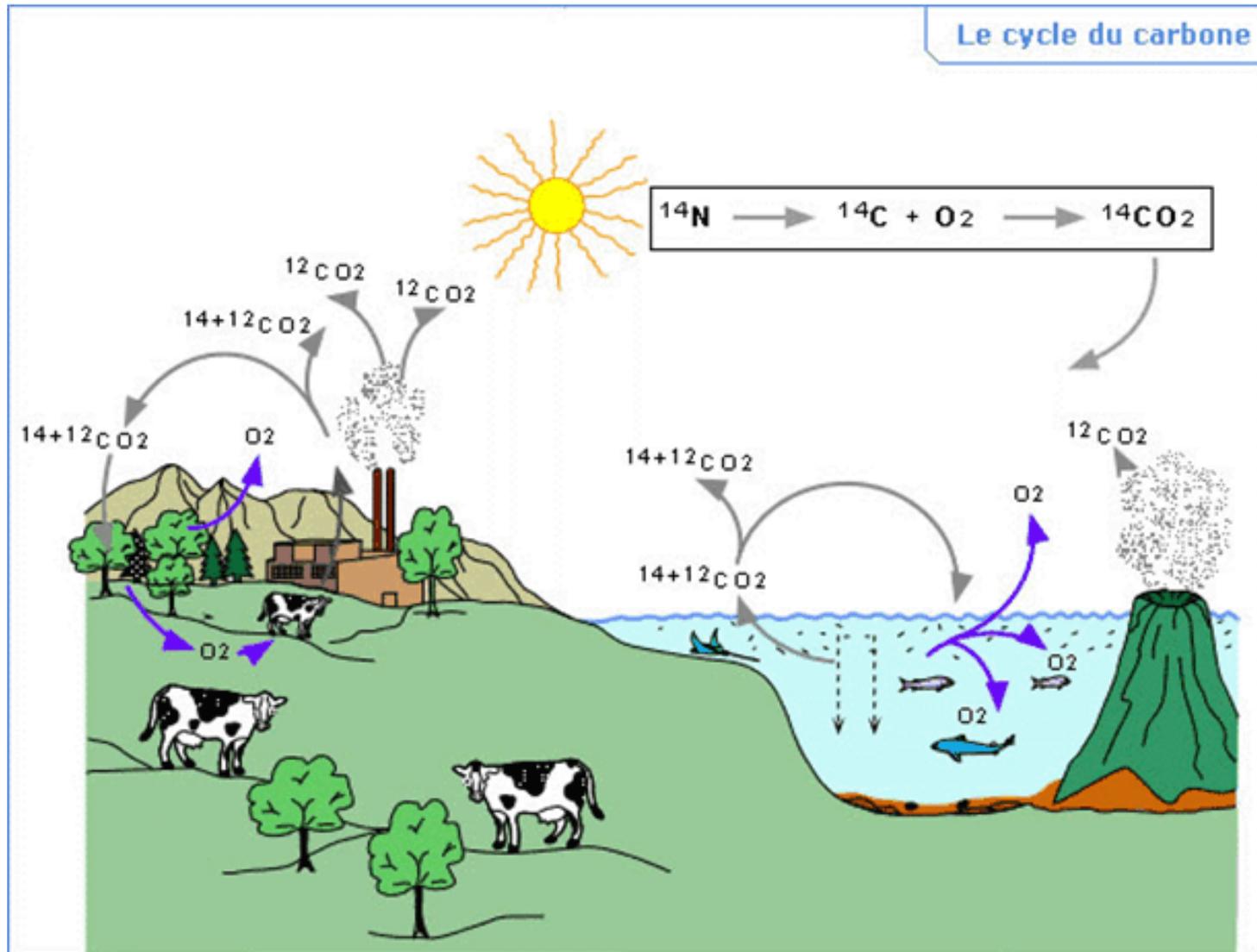


**Carbon-14**  
unstable (radioactive)

Key:  Proton  
 Neutron  
 Electron

## Les isotopes du carbone

# Datation au carbone 14



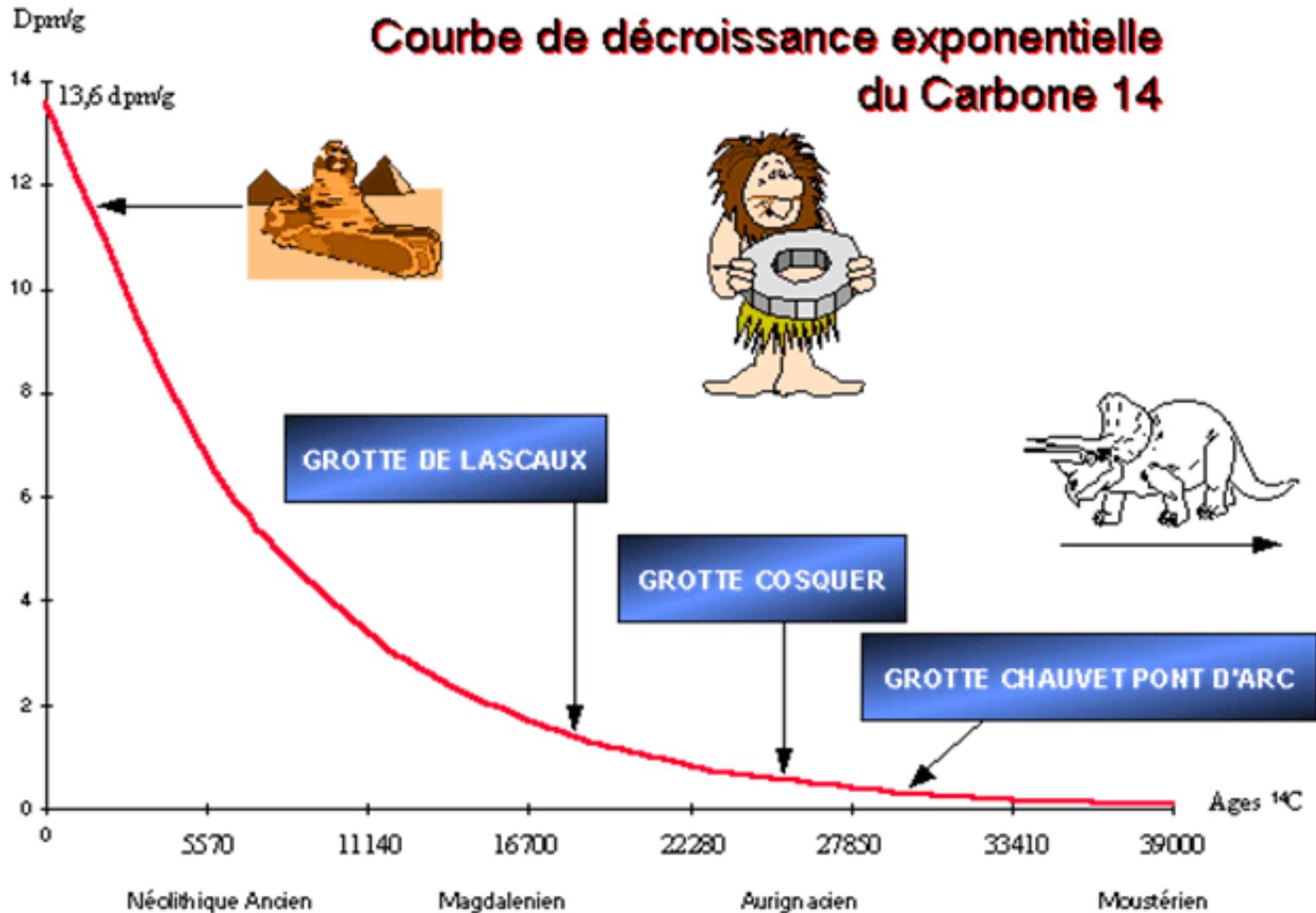
# Datation au carbone 14

En raison de la présence de  $^{14}\text{C}$ , l'activité du carbone atmosphérique est égale à 225 Bq par kg. Un spécimen archéologique contenant 0,6 g de carbone présente actuellement 209 désintégrations par heure. Sachant que la demi-vie du  $^{14}\text{C}$  est de 5730 ans, quel est son âge?

$$N_0 = 255 \text{ Bq} \qquad N_t = \frac{209 \times 1000}{3600 \times 0.6} = 96.76 \text{ Bq}$$

$$N_t = N_0 2^{-\frac{t}{T}} \Rightarrow t = -T \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{\ln 2} = -5730 \times \frac{\ln \frac{96.76}{255}}{\ln 2} = 8010 \text{ ans} \approx 8000 \text{ ans}$$

# Datation au carbone 14



# Les unités de masse atomique

Les physiciens ont choisi une unité de base ou de référence pour mesurer la masse des atomes et des noyaux : c'est l'unité de masse relative (u.m.a). **Par définition, l'unité de masse relative est de 1/12 de la masse du carbone 12**

On sait qu'une mole (=  $6 \cdot 10^{23}$  atomes) d'atomes de C a une masse de 12 g

Donc  $1 \text{ uma} = 12 \cdot 10^{-3} / 6,02 \cdot 10^{23} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Avec cette nouvelle unité, les masses des particules importantes sont :

M proton	= 1.0073 uma	= 1 uma
M neutron	= 1.0087 uma	= 1 uma
M électron	= 0.0005 uma	= 1 uma / 1836

## Le défaut de masse

Exemple : L'Hélium



masse des constituants

$$2m_p = 2 \cdot 1,0073 = 2,0146 \text{ uma}$$

$$2m_n = 2 \cdot 1,0087 = 2,0174 \text{ uma}$$

$$2m_e = 2 \cdot 0,0005 = 0,0010 \text{ uma}$$

$$\text{total} \quad \underline{\quad\quad\quad} \quad 4,0330 \text{ uma}$$

masse mesurée de  ${}^4_2\text{He}$

$$4,0026 \text{ uma}$$

On remarque donc que la somme des masses des particules constituantes est supérieure de 0,0304 uma (soit presque 1 %) à la masse de l'atome.

Un calcul similaire à propos de n'importe quelle autre sorte d'atome amènerait à la même conclusion, à savoir:

$$m_{\text{de l'atome}} < m_{\text{des nucléons}} + m_{\text{des électrons}}$$

# Masse-Energie

Relation d'Einstein:

La masse est une énergie

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

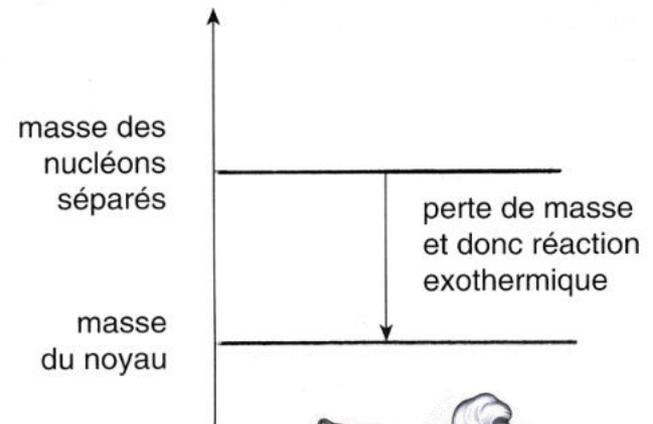
$E$	Energie en $J$
$M$	Masse en $kg$
$c$	Vitesse de la lumière = $3 \cdot 10^8 m/s$

## Energie de liaison d'un noyau

*Nous avons vu que si on formait un noyau à partir des nucléons, il y avait une perte de masse du système et donc en vertu de l'équivalence masse-énergie, il y aura dégagement de chaleur.*

*Inversement, si on cassait un noyau pour séparer les nucléons, il faudrait fournir une énergie équivalente*

**On appelle *énergie de liaison*  $E_l$  d'un noyau, l'énergie à fournir pour séparer les nucléons de ce noyau.**



# Masse-Energie

Si on formait une mole de noyaux d'hélium, l'énergie libérée serait de :  
 $4,54 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 10^{23} = 2,73 \cdot 10^{12} \text{ J}$

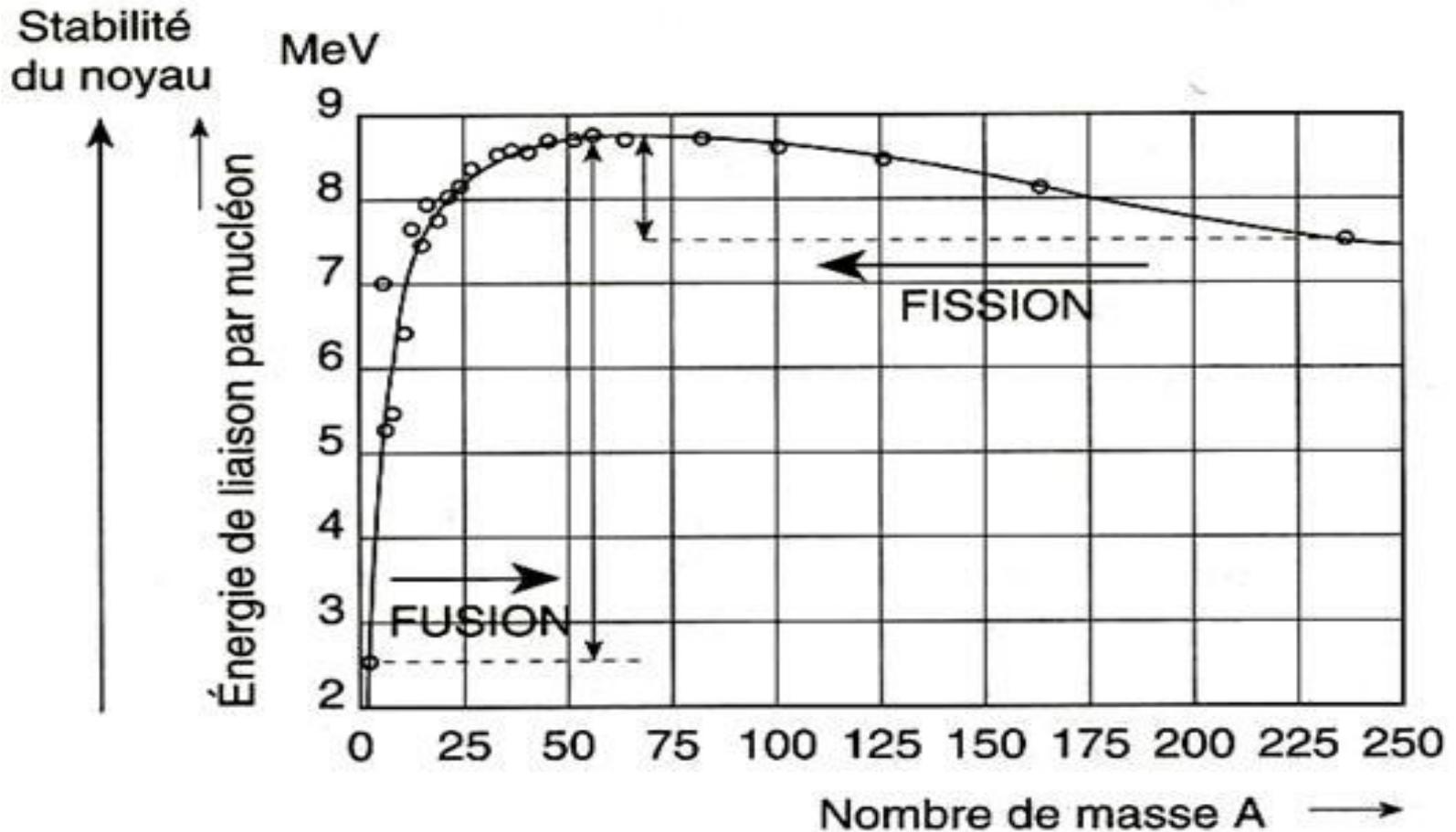
Cette énergie est **considérable** en rapport des énergies rencontrées en physique ou en chimie

Phénomène	Liaisons entre	Énergie par mole	Énergie par particule
Liquéfaction de l'eau à 100°C $\text{H}_2\text{O}_{(g)} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{(l)}$	molécules	41 kJ/mole	0,4 eV/molécule
Formation d'eau à 25°C à partir des corps purs simples $\text{H}_{2(g)} + \frac{1}{2}\text{O}_{2(g)} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{(l)}$	atomes	286 kJ/mole	3,0 eV/molécule
Neutralisation de protons: $\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{H}$	noyau et électron	1306 kJ/mole	13,6 eV/atome
Formation de noyaux ${}^4_2\text{He}$ à partir des nucléons	nucléons	$2,73 \cdot 10^9$ kJ/mole	28,3 MeV/noyau

# Energie de liaison par nucléon

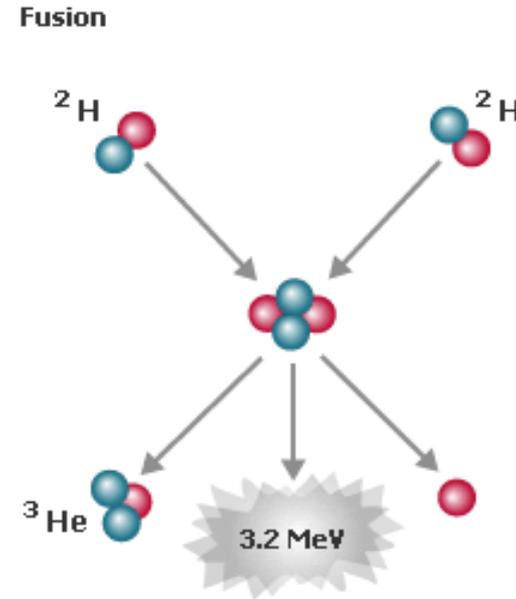
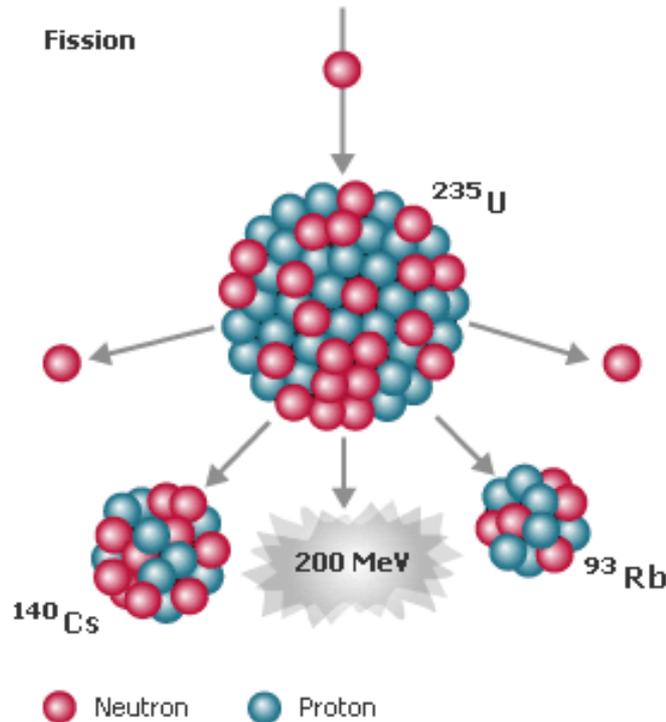
$$E_{L\text{nucléon}} = \frac{E_L}{A}$$

$E_{L\text{nucléon}}$	Energie de liaison par nucléon
$E_L$	Energie de liaison pour l'atome
$A$	Nombre de nucléon



# Obtention d'énergie

*Pour libérer de l'énergie nucléaire*, on peut donc par exemple :



*former des noyaux de masse moyenne à partir d'un noyau lourd, en le cassant: c'est la **fission nucléaire***

*former un noyau de masse moyenne à partir de noyaux légers, en les agglomérant : c'est la **fusion nucléaire***

# La fission nucléaire

Un noyau d'uranium 235 appelé fissile est frappé par un neutron. Il peut se casser en deux noyaux appelés produits de fission et libérer 2 ou 3 neutrons.

Trois nuclides artificiels sont actuellement utilisés pour la fission : Le plutonium Pu239 et Pu241 et l'uranium U235

**Si tous les noyaux d'un gramme d'U235 subissaient la fission, on aurait 80 milliards de joules soit autant d'énergie que la combustion complète de 2,5 tonnes de charbon.**

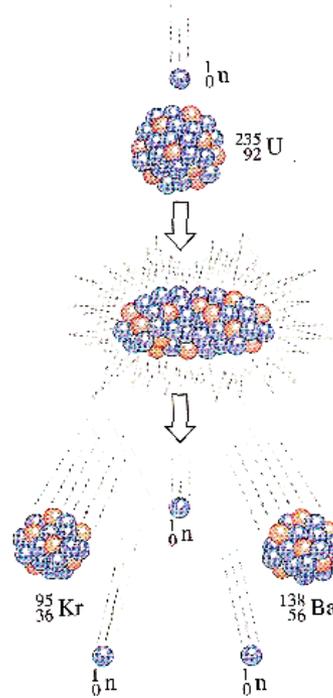


Figure 32.16 Fission de l'U-235.

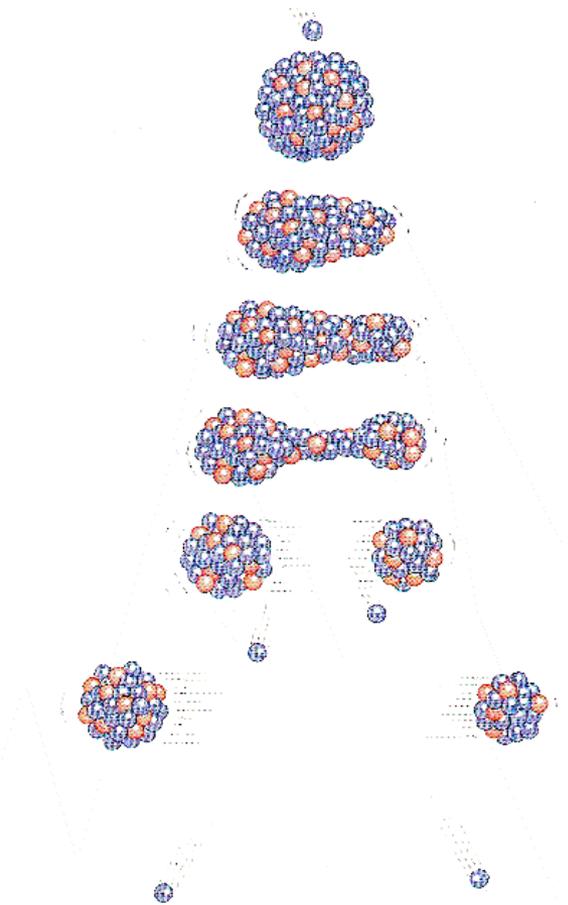
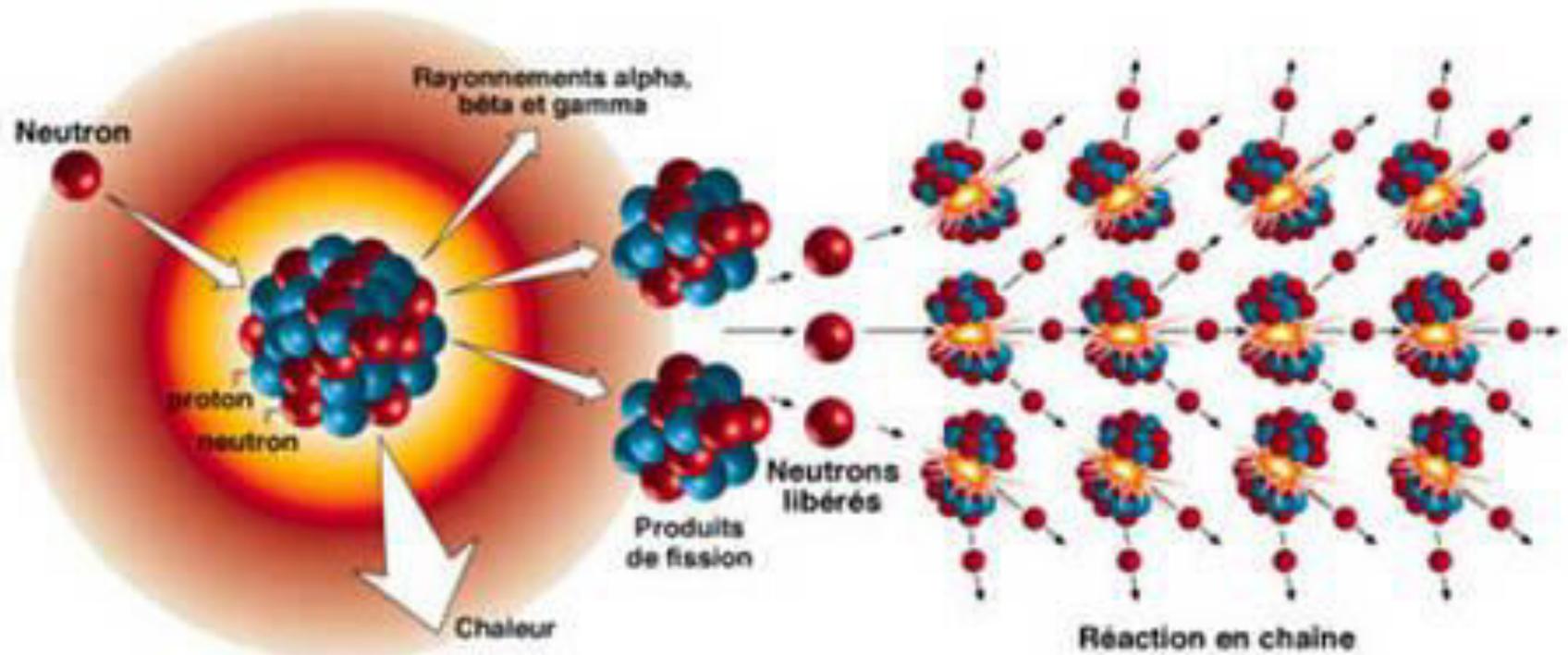


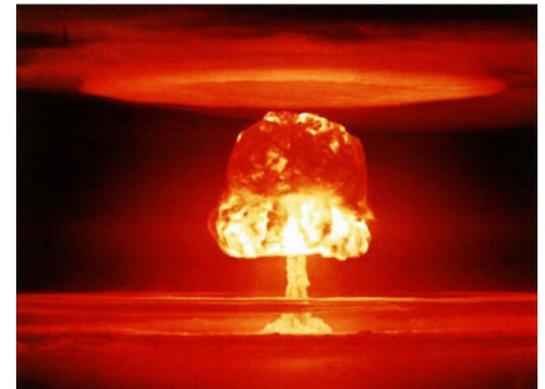
Figure 32.17 Fission nucléaire.

# La réaction en chaîne



Si une quantité suffisante d'uranium 235 est rassemblée (quantité appelée masse critique), alors au moins un des deux ou trois neutrons produits par une première fission va à son tour rencontrer un noyau U235 et provoquer une nouvelle fission, qui libérera deux ou trois neutrons parmi lesquels au moins un va, à son tour,..On parle de **réaction en chaîne**.

En très peu de temps, une très grande quantité d'énergie sera libérée: la réaction est explosive. **C'est le principe de la bombe nucléaire appelée (à tort) bombe atomique (bombe A).**



# Bombe à fission



**Bombe à uranium.  
« Little Boy »  
Hiroshima 6 août 1945**

64 kg d'uranium enrichi à 90 %.  
Energie équivalente à  
18000 tonnes de TNT.



**Bombe à Plutonium.  
« Fat Man »  
Nagasaki 9 août 1945**

7 kg de plutonium quasi pur.  
Energie équivalente à  
23000 tonnes de TNT.

# Hiroshima et Nagasaki



**Hiroshima :**

6 aout 1945. Entre 96000 et 166000 morts

**Nagasaki :**

9 aout 1945. Entre 60000 et 80000 morts.

**Total :** entre 150000 et 246000 morts



# Hiroshima



# Conditions pour obtenir une réaction en chaîne

- Une concentration suffisante de noyaux fissiles.

Sinon les neutrons sont absorbés par les autres noyaux de l'échantillon.

- Une masse suffisante de matériau (masse critique)

Sinon trop de neutrons sortent de l'échantillon.

- Un ralentissement (éventuel) des neutrons secondaires produits.

Car les neutrons trop rapides peuvent difficilement être captés par les noyaux fissiles.

# L'uranium

L'uranium a été découvert en 1789 dans la **pechblende**, un minerai d'oxyde d'uranium ( $UO_2$ ). Ce nom a été choisi en référence à la planète Uranus découverte en 1781.

L'uranium naturel est composé presque entièrement de 2 isotopes:

- 99,3 % d'U-238 (non fissile)
- 0,7 % d'U-235 (fissile)



**L'uranium est radioactif  $\alpha$ .**

A la suite de désintégrations successives, il se transforme en **plomb**.

En passant notamment par le radium, le radon, le polonium...

**Pour pouvoir être utilisé dans les centrales, l'uranium naturel doit, dans la plupart des cas, être **enrichi en U-235 (3,5 % , minimum)****

# Enrichissement de l'Uranium

Dans la nature, il n'y a que 0,7% d' U235 pour 99,3% d' U238. Pour assurer le bon fonctionnement des réacteurs, la proportion d'U235 doit être entre 3% et 5% pour la production d'électricité. Il est donc nécessaire d'« **enrichir**» l'uranium naturel. Il existent différents procédés :

Deux méthodes principales utilisant l'hexafluorure d'uranium gazeux. ( $UF_6$ )

- La **diffusion gazeuse**
- L'**ultracentrifugation**

# Diffusion gazeuse

- On filtre l' $\text{UF}_6$  au travers d'une paroi poreuse.
- Les molécules contenant de l'U - 235, plus légères et donc plus rapides, sont plus nombreuses à traverser la paroi.
- De l'autre côté de la paroi la proportion d'U-235 est légèrement augmentée.
- Une usine peut comporter 1400 diffuseurs en cascade.



Usine de Pierrelatte (Drôme, France)



Diffuseurs

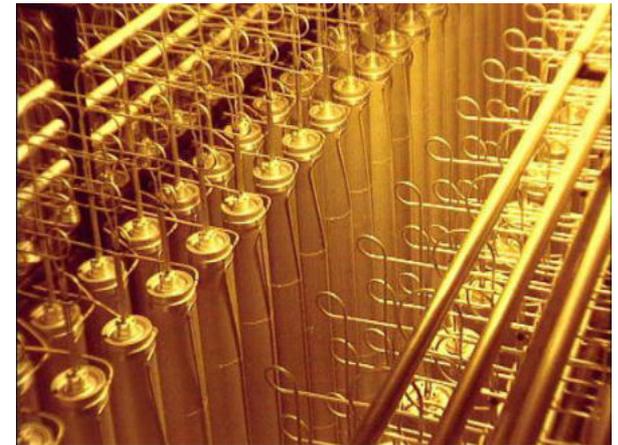
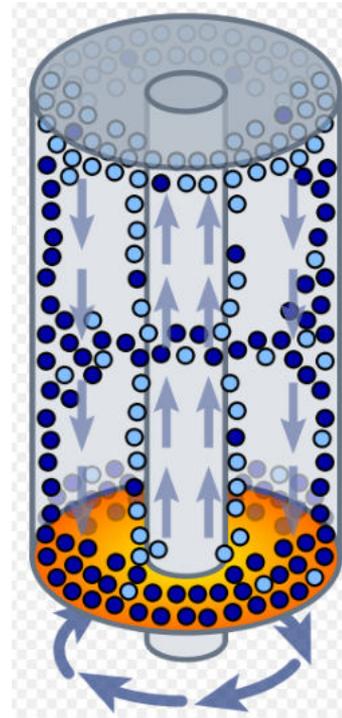
La diffusion gazeuse requiert environ 60 fois plus d'énergie que le procédé d'ultracentrifugation, soit 6% de l'énergie qui sera finalement produite avec l'uranium enrichi résultant. Cette méthode tend aujourd'hui à être remplacée par des procédés moins coûteux.

# Ultracentrifugation

- Des **centrifugeuses** contenant de l' $UF_6$  tournent à très grande vitesse.
- Les molécules contenant de l'U-238, plus lourd, s'accumulent davantage en périphérie.
- Au centre, le gaz est enrichi en U-235.
- Les centrifugeuses sont disposées en cascade.
- Ce procédé est plus moderne et consomme beaucoup moins d'énergie que la diffusion.



Usine de Portsmouth (Ohio, USA)

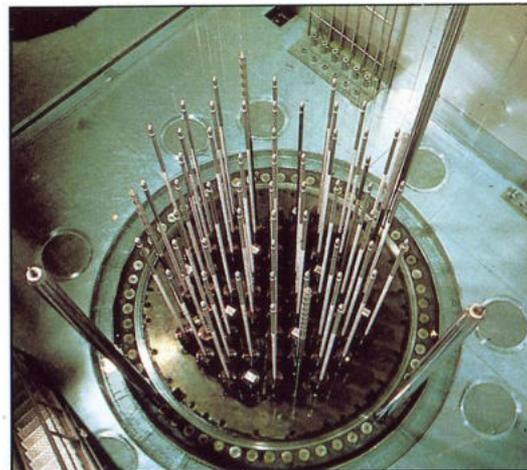
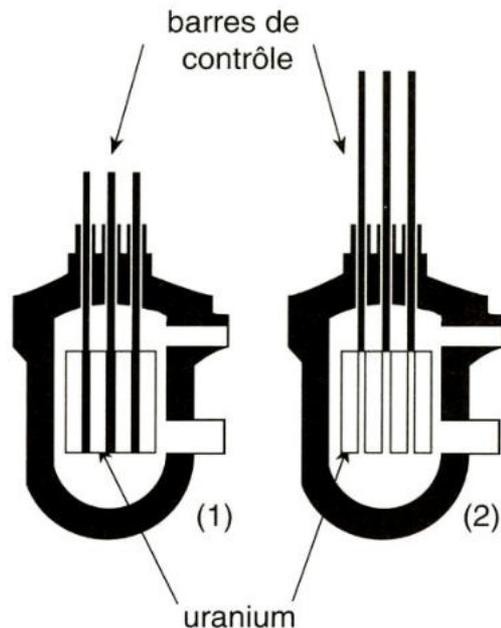


Centrifugeuses

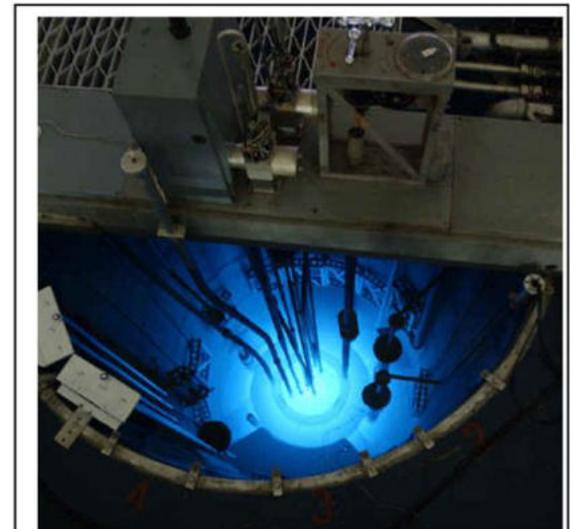
# Le réacteur nucléaire

L'usage pacifique de ce phénomène nécessite le **contrôle** de la réaction en chaîne: il faut faire en sorte qu'en moyenne, **un seul** des deux ou trois neutrons produits par chaque fission de la chaîne, provoque une nouvelle fission.

Il faut donc « éliminer » les neutrons excédentaires; c'est le rôle des **barres de contrôle** contenant du cadmium (Cd): ***c'est un métal neutrophage c'est-à-dire absorbeur de neutrons.***

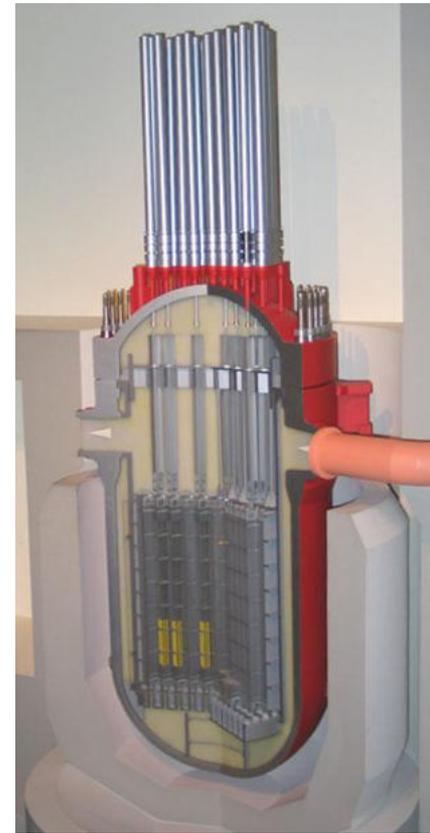


Barres de commande.



La lueur bleue dans la piscine est une conséquence des radiations, connue sous le nom d'effet Cherenkov (bien visible ci-dessous, lors du fonctionnement d'un réacteur nucléaire de recherche de l'université de Parme, en Italie) :

# Le réacteur nucléaire

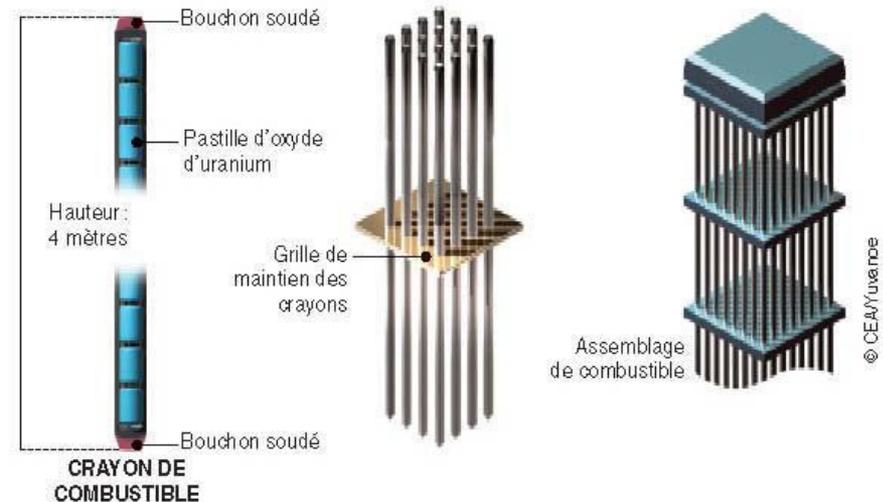


Le réacteur de Tihange 1 est constitué d'une cuve de **270 tonnes** dont les parois, en acier inoxydable, sont épaisses de **25 cm**. Elle est enfermée dans une **double enceinte** de confinement en béton.

# Le réacteur nucléaire

## Le combustible

- Il est assemblé en long tubes (ou **crayons**) de 4 m, en zirconium, maintenus ensemble par des grilles de support.
- Ces crayons contiennent des **pastilles** de combustible empilées.
- Le combustible est de l'oxyde d'uranium ou un mélange d'oxyde d'uranium et de plutonium (le **MOX**).
- Un crayon contient environ 300 pastilles d'une masse totale d'environ 2 kg.



**La fission d'un gramme d'uranium libère autant d'énergie que la combustion de 2,5 tonnes de charbon.**

Un réacteur de 1 MW peut comporter, par exemple:  
177 assemblages de 264 crayons chacun.  
Soit **72 tonnes** d'uranium.  
Tous les **3 ans**, un **tiers** des assemblages est renouvelé.

# Le réacteur nucléaire

- **Le fluide caloporteur**

Il circule entre les crayons pour transporter la chaleur produite par les fissions nucléaires.

- **Le modérateur**

Disposé entre les crayons de combustible, il freine les neutrons pour leur permettre d'être captés par les noyaux fissiles. Un neutron **lent** (d'énergie cinétique équivalente à celle d'une molécule d'air à température normale, environ 0,04 eV) a plus de probabilité de déclencher une fission qu'un neutron rapide. Or les neutrons produits par les fissions sont rapides. ***Il faut donc les ralentir, ce qui se fait grâce aux collisions des neutrons avec des noyaux légers d'une substance appelée modérateur***

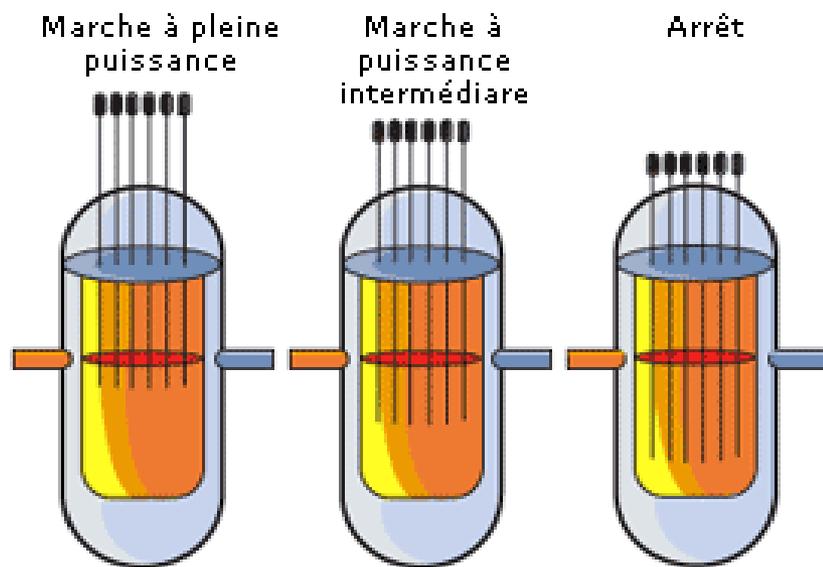
Dans les centrales **PWR**, l'**eau ordinaire** est utilisée à la fois comme **modérateur** et comme **liquide caloporteur**.

Cette eau est sous une pression de **150 bars** qui lui permet de rester liquide à des températures de l'ordre de **300 °C**.

(Réacteur à eau pressurisée)

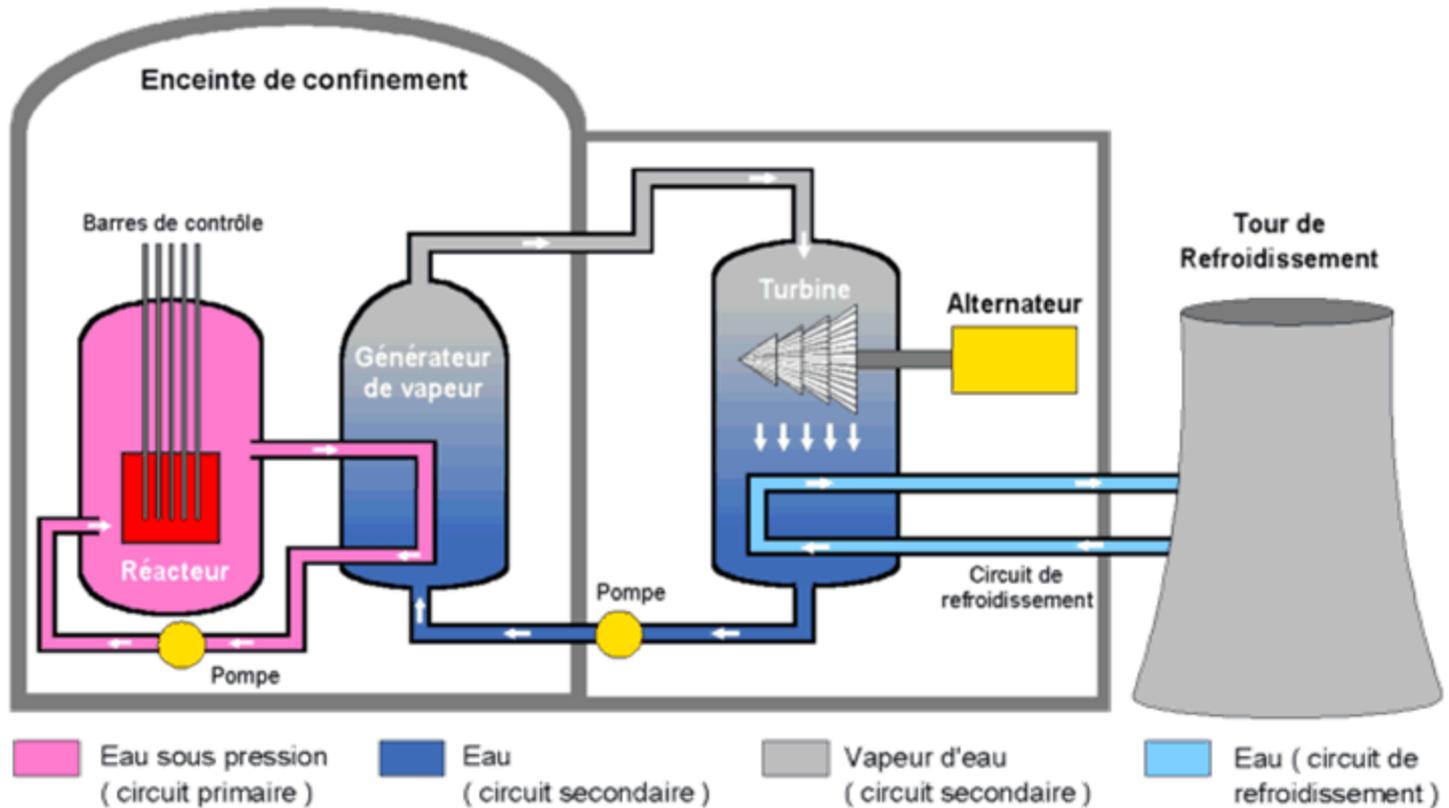
# Le réacteur nucléaire

**Les barres de contrôle** Elles sont introduites dans le réacteur ou en sont retirées pour le piloter. Elles sont constituées d'un matériau absorbant les neutrons (Cadmium, bore, gadolinium). ***Enfoncer les barres de contrôle dans le réacteur fait diminuer le nombre de neutrons, donc fait diminuer le nombre de fissions, et ainsi fait baisser la puissance du réacteur. Inversement, retirer les barres fait augmenter la puissance***



Salle de contrôle

# Schéma de principe d'une centrale



Notez qu'il y a **trois** circuits d'eau

# La centrale nucléaire PWR



Le réacteur comporte 3 circuits d'eau indépendants.

- **Le circuit primaire**

Il transporte la chaleur du réacteur vers un échangeur.

- **Le circuit secondaire**

L'eau reçoit la chaleur du circuit primaire dans l'échangeur où elle est vaporisée.

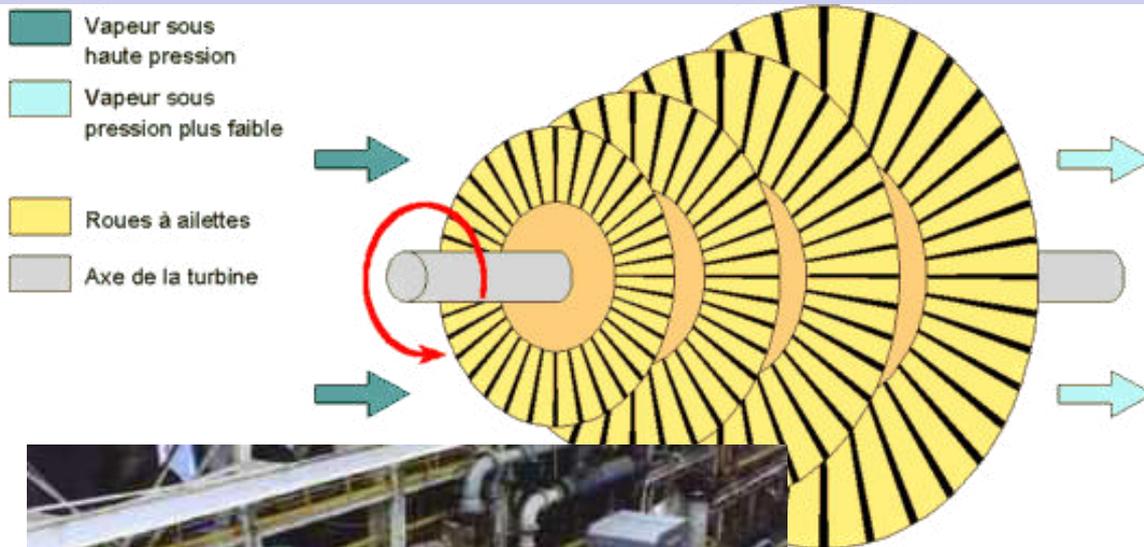
Elle actionne la turbine qui fait tourner l'alternateur.

- **Le circuit de refroidissement**

Il refroidit et liquéfie

l'eau du circuit secondaire.

# La turbine à vapeur



La vapeur à haute pression est projeté sur des roues à ailettes qu'elle fait tourner.

La turbine actionne l'alternateur qui produit le courant.



Turbine et alternateur



Rotor de la turbine

# Refroidissement

Comme toutes les machines thermiques qui **transforment de la chaleur en énergie mécanique** une centrale électrique doit rejeter une partie de la chaleur dans une **source froide**.

L'eau du circuit de refroidissement est refroidie.

- Par un **fleuve** ou la **mer**.
- Par **l'air atmosphérique** dans une tour réfrigérante d'où une petite partie (1,5 %) s'échappe en vapeur qui se condense en forme de panache blanc.

Le **rendement** d'une centrale nucléaire est d'environ **35%** .

**65 %** de l'énergie produite par le réacteur est rejetée sous forme de chaleur dans l'environnement.



# Quelques types de centrales nucléaires

- Centrale à réacteur à **eau pressurisée** (PWR).  
**60% dans le monde et 80 % en Europe.**
- Centrale à réacteur à **eau bouillante**, modéré au **graphite**.  
**Conception soviétique (Tchernobyl).**
- Centrale à réacteur utilisant de l'**uranium naturel** modéré par de l'**eau lourde**  
**Filière canadienne**
- Centrale à réacteur à **eau bouillante**.
- Centrale à **neutrons rapides** et à **sodium** comme fluide caloporteur.  
**Centrale Superphénix de Creys-Malville (France). Abandonnée.**
- .....

# Le nucléaire en Belgique

## 2 centrales PWR

### Tihange (Huy)

Début de l'exploitation: 1975

3 unités totalisant 3130 MW

### Doel (Anvers)

Début de l'exploitation: 1974

4 unités totalisant 2960 MW



Le nucléaire, en Belgique, assure 57% de la production d'électricité.

# Centrale nucléaire de Tihange



# Le nucléaire en Belgique

TABLEAU 1 : Un aperçu des installations électronucléaires en Belgique

Centrales nucléaires	Filière	Opérateur	Entrée en fonction / commercialisation	Année de CDE	Puissance nette installée (MW)
BR-3	REP	CEN	1962	1987	12
DOEL-1	REP	ELECTRABEL	1974 / 1975	Nd.	412
DOEL-2	REP	ELECTRABEL	1975	Nd.	412
DOEL-3	REP	ELECTRABEL	1982	Nd.	1056
DOEL-4	REP	ELECTRABEL	1985	Nd.	1041
TIHANGE-1	REP	ELECTRABEL	1975	Nd.	1009
TIHANGE-2	REP	ELECTRABEL	1982 / 1983	Nd.	1000
TIHANGE-3	REP	ELECTRABEL	1985	Nd.	1065

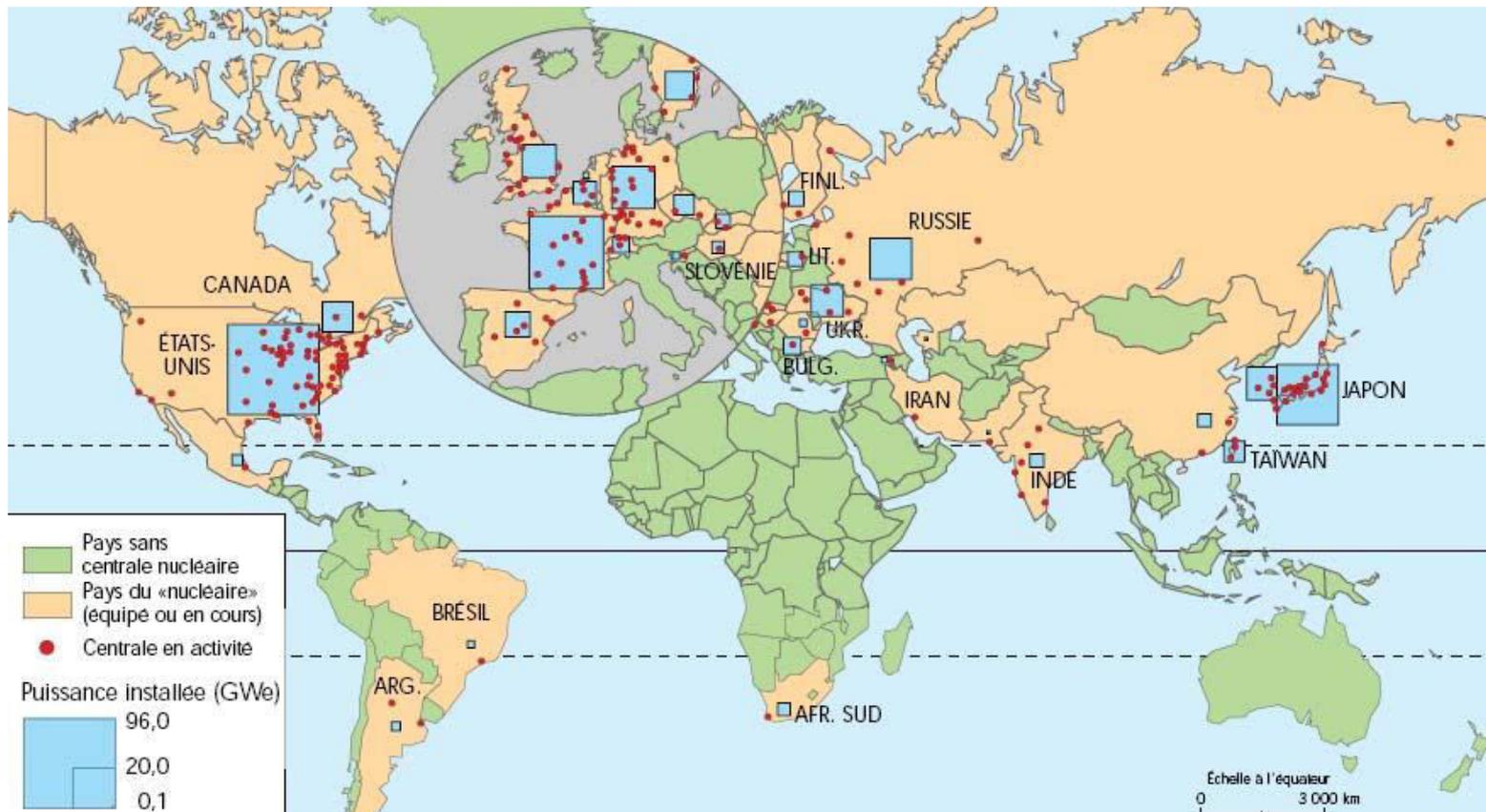
Source : Power Reactor Information System, [www.iaea.org](http://www.iaea.org)

Un total de 7 réacteurs a été construit entre 1975 et 1985, quatre unités à Doel et 3 unités à Tihange. Elles sont toutes du type PWR et ensemble elles représentent une capacité totale de 5801 MW. En 2005, environ 56% de l'électricité consommée en Belgique était d'origine nucléaire.

En janvier 2003, la Belgique a voté une loi stipulant que les sept unités devraient être fermées après 40 ans d'opération. Le premier réacteur devrait donc être arrêté en 2015 et le dernier en 2025.

Cependant, en novembre 2006, le ministère fédéral de l'énergie a publié un rapport préliminaire qui conclut que, au vu des circonstances présentes, la sortie éventuelle du nucléaire requiert un changement profond dans la position officielle de la Belgique et que le planning devrait être revu.

# Le nucléaire dans le monde



Le nucléaire, dans le monde, assure 17% de la production d'électricité.

# Les produits de la fission de l'U235

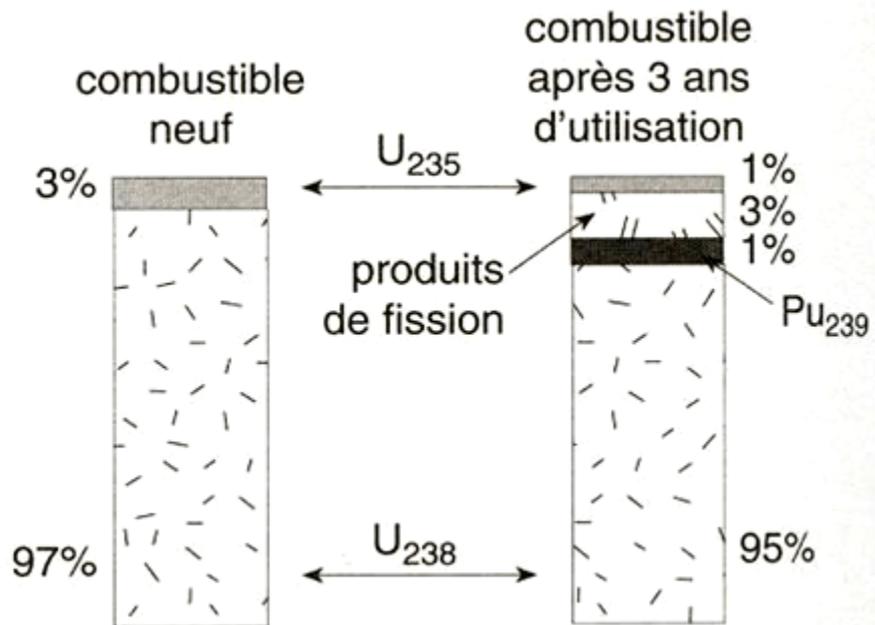
Plus de cent **nucléides** différents peuvent être libérés lors de la fission de l'uranium.

Les deux fragments sont, le plus souvent:

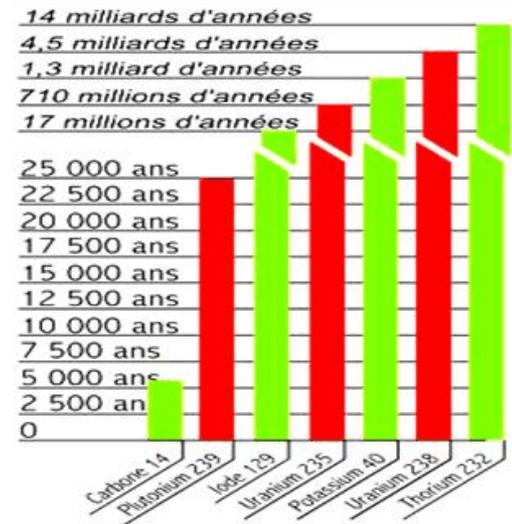
- Un noyau de nombre de masse autour de  $A=95$  (brome, krypton, zirconium, strontium ...)
- Un noyau de nombre de masse autour de  $A=139$  (iode, xénon, baryum, césium...)

Les produits de fission peuvent être à l'état gazeux, liquide ou solide.  
La plupart sont **radioactifs** et constituent les **déchets radiotoxiques**.

# Les déchets nucléaires



Les déchets nucléaires perdent la moitié de leur radioactivité en :



Période ou demi-vie du césium 137 : 33 ans

Période ou demi-vie du plutonium 239 : 24 360 ans

Au bout de 10 périodes, 0,1 % de la radioactivité subsiste encore, ce qui peut être considérable.

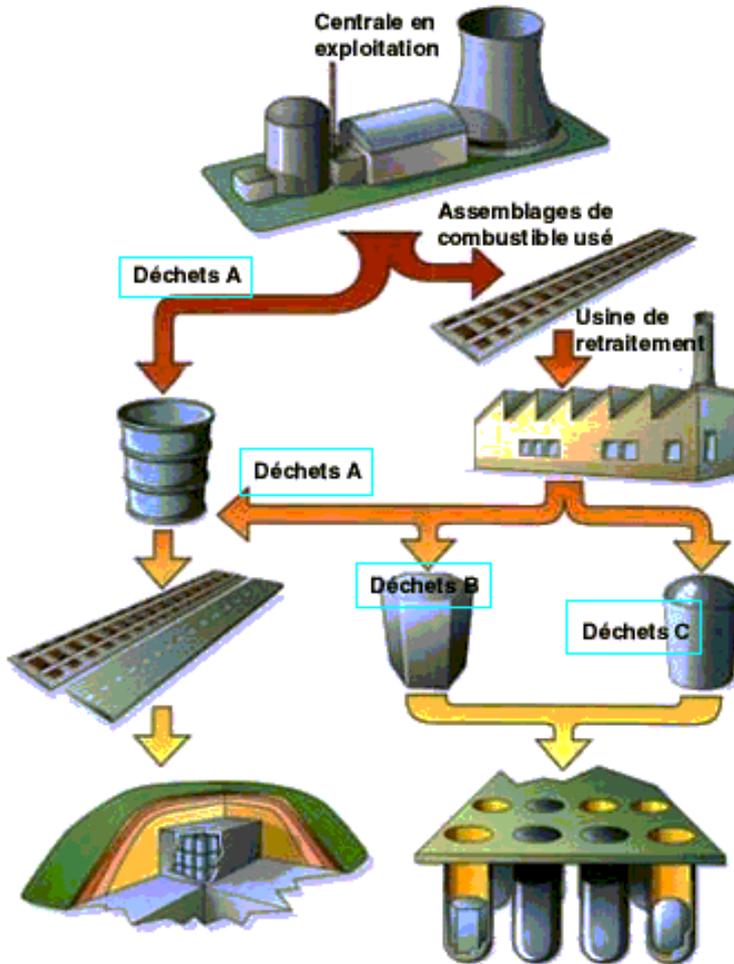
## Caractéristiques des déchets nucléaires

Type de déchet nucléaire		Contribution dans le total		Radioactivité
Période	Activité	Volume (%)	Rayonnement (%)	(Bq/g)
Longue	Haute	0.2%	91.68%	> 1 million
Longue	Moyenne	4.4%	8.22%	< 1 million
Longue	Faible	4.6%	0.013%	< 500000
Courte	Faible, Moyenne	76.8	0.055%	< 500000

# Le plutonium

- Le plutonium est produit dans les centrales nucléaires par la capture d'un neutron par l'U - 238.
- Le plutonium est un métal argenté très radioactif et très toxique (un milligramme de plutonium peut suffire à produire un cancer).
- Après retraitement des déchets, le plutonium, mélangé à de l'uranium peut-être réutilisé dans les centrales (MOX)
- 5 kg de plutonium permettent de fabriquer une bombe atomique.

# Les déchets radioactifs



## A: Déchets de faible radioactivité, à vie courte

- 90% de la totalité des déchets radioactifs.
- Filtres, Gants et petit matériel
- Ils sont compactés dans des fûts de métal ou de béton.
- Souvent entreposés sur les sites de production.

## B: Déchets de moyenne radioactivité, à vie longue

- 9% de la totalité des déchets radioactifs.
- Actifs pendant plusieurs milliers d'années.
- Proviennent principalement des usines de retraitement (boues, gaines de combustibles).
- Compactés dans des fûts de métal ou de béton.
- Une des options envisagées est de les enterrer en profondeur.
- France: 2000 m<sup>3</sup> par an

## C: Déchets de forte radioactivité, à vie longue

- 0,5% de la totalité des déchets radioactifs.
- Reste de la combustion de l'uranium, produits de fission, récupérés après retraitement.
- Coulés dans du verre (vitrification).
- France: 100 m<sup>3</sup> par an

**L'uranium et le plutonium, récupérés dans les déchets peuvent être réutilisés dans les centrales.**

# Traitement des déchets nucléaires

Le traitement des déchets radioactifs comprend essentiellement deux étapes: premièrement, réduire au maximum le volume des déchets et deuxièmement, stabiliser et confiner ces déchets. Le traitement des déchets radioactifs bruts et hétérogènes consiste à obtenir un produit solide, compact et stable enfermé dans un fût pouvant être aisément manipulé. Chaque fût reçoit sa propre fiche d'identification qui indique son origine, son contenu radioactif et ses caractéristiques physiques et chimiques.



*Les galettes.*



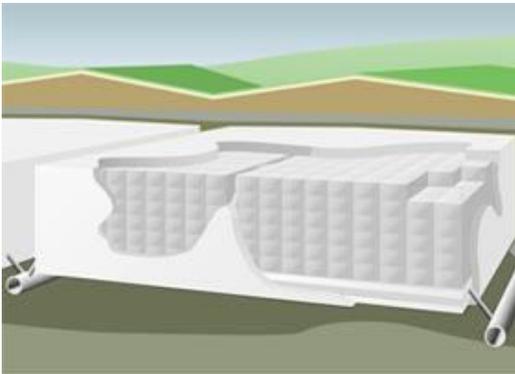
*Coupe d'un fût de 400 l. On distingue les différentes galettes et la matrice d'immobilisation.*

Les conteneurs qui renferment les déchets du retraitement de combustibles nucléaires usés belges par COGEMA ont une capacité de 150 litres et mesurent 1.34 m de haut pour 0.43 m de diamètre ; une fois rempli, un conteneur pèse en moyenne 450 kg et dégage une quantité de chaleur maximale de 2.000 watt, ce qui est comparable à la chaleur émise par un radiateur électrique. Le contenu de chaque conteneur correspond au retraitement de 1,5 tonne de combustible usé, soit la quantité de combustible nécessaire pour assurer la consommation électrique d'environ 116.000 foyers belges pendant un an.

*(Illustration : maquette d'un conteneur en acier inoxydable dans lequel sont confinés 400 kg de déchets vitrifiés. La paroi de la maquette est ouverte, ce qui permet de voir la structure de verre en noir).*



# Le dépôt final en surface des déchets radioactifs



Dans le dépôt final en surface, les fûts contenant les déchets irradiés sont placés dans des modules en béton. Ceux-ci sont recouverts de plusieurs de terre et de matériau étanche. Un tel site de dépôt est synonyme de sûreté pendant 300 ans. Les barrières qui protègent l'homme et l'environnement contre le rayonnement sont constituées par:

- l'encapsulage des déchets dans du béton ou du bitume
- les fûts en acier galvanisés dans lesquels les déchets encapsulés sont placés
- le module en béton dans lequel les fûts sont disposés par quatre
- le dispositif de dépôt final proprement dit
- les différentes couches de couverture placées sur l'installation et le sous-sol dans lequel celle-ci est implantée

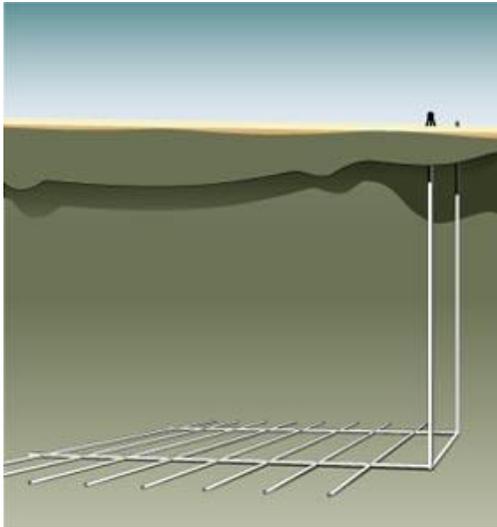
Le dépôt final en surface s'applique uniquement aux déchets de faible activité et à vie courte.

# Le dépôt final en profondeur des déchets radioactifs

Les déchets sont confinés dans une infrastructure à grande profondeur dans des couches d'argile profond. Les barrières qui protègent l'homme et l'environnement contre le rayonnement sont constituées par;

- l'encapsulage des déchets dans du béton ou du bitume
- les fûts qui abritent les déchets encapsulés
- les parois des galeries souterraines: lorsqu'une galerie est pleine, du béton est coulé dans l'espace qui sépare les fûts de manière à le remplir complètement
- la couche géologique: la roche d'accueil stable peut isoler les matières radioactives pendant des centaines de milliers d'années, ce qui permet l'extinction du rayonnement des déchets de haute activité et à vie longue.

**Le dépôt final en profondeur s'applique aux déchets de haute activité et à vie longue.** Les couches d'argile peuvent offrir une protection efficace à très long terme. Elles sont peu perméables à l'eau et fixent efficacement les matières radioactives à temps de demi-vie long. Ces couches sont déjà stables depuis plusieurs millions d'années et possèdent un pouvoir réparateur :les entailles et les fissures se referment d'elles-mêmes avec le temps.



# Que signifie exactement le Protocole de Kyoto pour la Belgique ?

- En vertu du Protocole de Kyoto, la Belgique doit réduire ses émissions de gaz à effet de serre de - 7,5 % par rapport aux émissions enregistrées en 1990.
- Dans la pratique, cet objectif de réduction se traduit par une quantité maximale autorisée d'émissions (les droits d'émission).
- En d'autres mots, la Belgique a reçu le droit d'émettre, chaque année, durant la période 2008-2012, une quantité de gaz à effet de serre égale à 92,5 % des émissions de 1990.

# Comment la Belgique peut-elle satisfaire à ses obligations?

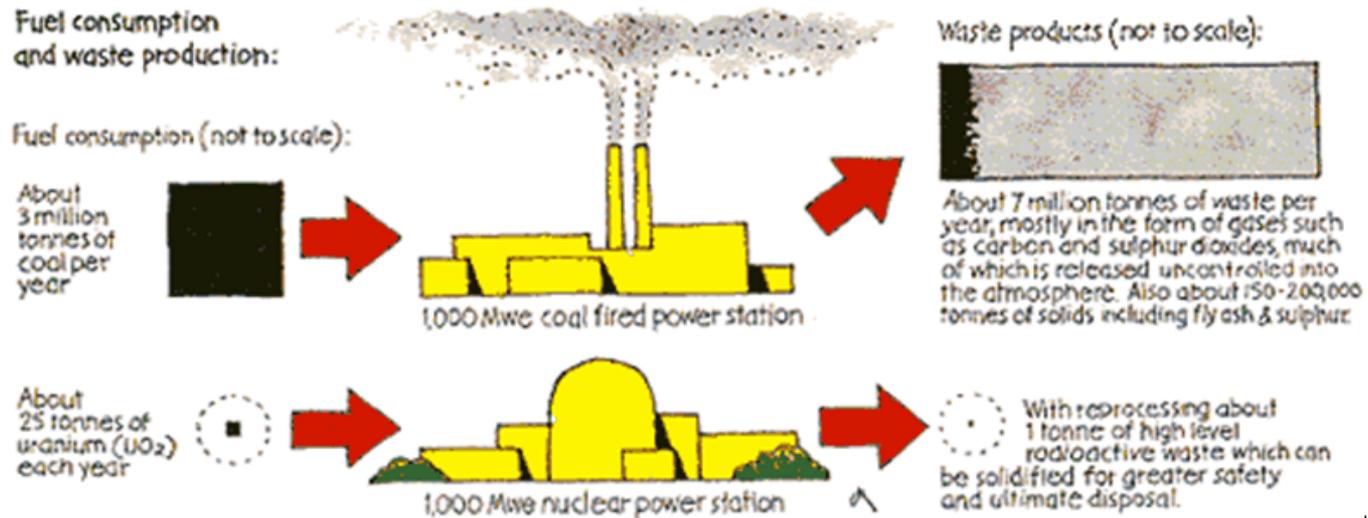
- De deux manières :
  - soit en réduisant ses émissions de gaz à effet de serre
  - soit en achetant des droits d'émission à l'étranger en utilisant les mécanismes de flexibilité prévus par le protocole de Kyoto

Après 2012, les Nations Unies vérifieront si la Belgique peut prétendre à cette quantité de droits d'émission en fonction des gaz à effet de serre qui auront été effectivement émis. Si c'est le cas, la Belgique aura satisfait à ses obligations. Si non, des sanctions suivront.

# Quel effort est-il nécessaire ?

- En 1990, les émissions s'élevaient à 146,24 millions de tonnes d'équivalents CO<sub>2</sub> .
- En 2001, ces émissions avaient déjà grimpé à 149,30 millions de tonnes d'équivalents CO<sub>2</sub> alors que l'objectif de Kyoto est fixé en dessous de cette quantité, à 135,27 millions de tonnes d'équivalents CO<sub>2</sub>.
- En se basant sur l'année 2001, il y a donc un déficit de 14,03 millions de tonnes d'équivalents CO<sub>2</sub>.

# Centrale à charbon et centrale nucléaire



## Unité au charbon

- 3.1 millions de tons de charbon
- 7 millions de tons de CO<sub>2</sub>
- 200 000 tons de SO<sub>2</sub> qui donneront naissance aux pluies acides.
- 200 000 tons de poussières qui contiennent de fortes teneurs en métaux lourds, (Arsenic, cadmium et mercure) et autres substances cancérigènes.

## Unité nucléaire

- 24 tons d'UO<sub>2</sub> enrichi à 4% ce qui demande environ 200 tons d'uranium récupérés de l'extraction de 25 à 100 000 tons de minerai.
- 27 tons de déchets dont 97% est recyclés. Le reste 3% soit environ 700 kg est hautement radioactif et doit être stocké.

# Le nucléaire est-il la réponse à Kyoto

Si on devait remplacer, en Belgique, les centrales nucléaires (5800 MW) par des centrales au charbon, on aurait

## Charbon

1. 18 millions de tons de charbon
2. 40 millions de tons de CO<sub>2</sub>
3. 1.2 millions de tons de SO<sub>2</sub>
4. 1.2 millions de tons de poussières

## Nucléaire

1. 145 à 580000 tons de minerai d'uranium
2. 157 tons de déchets radioactifs
3. 4 tons de déchets hautement radioactifs



Alors qu'il nous faudrait réduire le CO<sub>2</sub> d'environ 14 millions de tons (sur 146), le charbon en ajouterait 40 millions !!!!

**Où trouver la différence?**

# Avantages des centrales nucléaires

1. L'existence des centrales nucléaires permet de diversifier la provenance de notre approvisionnement en énergie: l'uranium n'est pas acheté aux mêmes pays que le pétrole. L'uranium est relativement abondant. La production mondiale est de l'ordre de 35 000 tons. Toute la production est pratiquement utilisée pour la production d'électricité
2. Le prix de revient du kWh nucléaire est inférieur à celui du kWh classique.
3. Dans ce prix de revient, la part de l'achat de combustible est inférieure: 37 % pour une centrale nucléaire contre 70 % pour une centrale thermique: il y a diminution de la dépendance financière vis-à-vis de l'étranger.
4. Le stockage du combustible: 6 m<sup>3</sup> d'uranium enrichi représentent 3 ans de fonctionnement d'une centrale de 1000 MW; tandis que 500 000 m<sup>3</sup> de charbon n'en représente que 3 mois!
5. Pas de production de CO<sub>2</sub>

# Inconvénients des centrales nucléaires

1. Quantités énormes de substances radioactives contenues dans le cœur : 70 tonnes de combustible.
2. Les produits de fission tous radioactifs, certains ayant une demi-vie très longue
3. Beaucoup de noyaux (de l'eau, des tubes en acier, de la cuve, du circuit primaire,...), irradiés par les neutrons, deviennent radioactifs.
4. Parmi les **accidents** possibles, le plus grave serait la rupture du circuit primaire, car le cœur ne serait plus refroidi; Les parades consistent à prévoir:
  - plusieurs circuits primaires
  - des circuits de refroidissement d'urgence.
5. Dangers localisés **en amont et en aval** des centrales: production et transport du combustible; transport et retraitement des produits de fission; stockage des déchets; et finalement la centrale elle-même, désaffectée après 20 ou 30 ans, murée et abandonnée pour de nombreux siècles!
6. Danger de prolifération d'armes nucléaires: le plutonium provenant de l'absorption d'un neutron par l'uranium 238 peut être utilisé à des fins militaires.
7. **Aucune solution vraiment valable pour les déchets nucléaires.**

# Conclusion (Provisoire)



**Pour ou contre?**

C'est à vous de  
décider de l'avenir  
que vous voulez.

Pensez-y lorsque  
vous voterez.

Les deux problèmes majeurs du nucléaire sont la sécurité et l'absence de solution pour le traitement des déchets.



## Des solutions?

- Une nouvelle génération de centrale.
- La fusion.



### Qu'est-ce que MYRRHA?

MYRRHA (**M**ultipurpose **hY**brid **R**esearch **R**eactor for **H**igh-tech **A**pplications) sera au niveau mondial le premier projet de démonstration d'une nouvelle classe de systèmes nucléaires pilotés par accélérateur de particules (Accelerator Driven System – ADS). MYRRHA sera un réacteur sous-critique d'une puissance de ~50 MW. Le terme 'sous-critique' signifie que le réacteur ne peut maintenir la réaction de fission en chaîne par lui-même, minimisant ainsi le risque potentiel d'accidents.

Les applications de MYRRHA sont multifonctionnelles et multiples. Un des avantages majeurs de cette installation est sa capacité à réduire la toxicité à long terme des déchets nucléaires par le biais de la séparation et de la transmutation, contribuant ainsi à fournir une solution possible à ce défi.

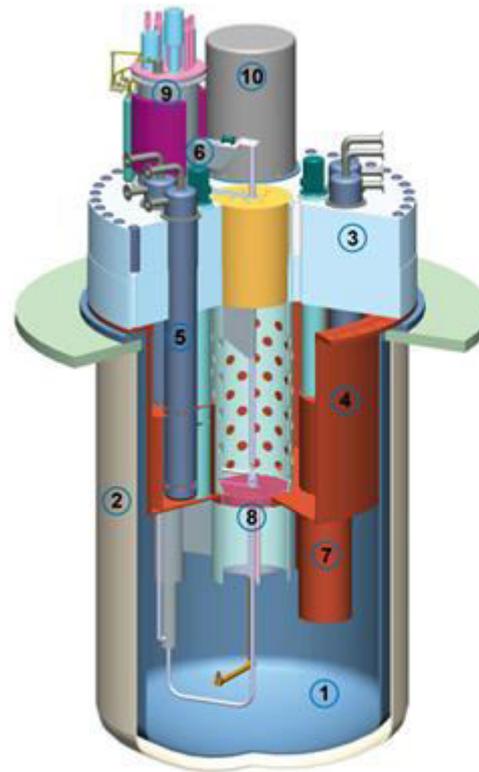
Une autre application cadre dans la technologie des réacteurs de la quatrième génération. Ces réacteurs produiront beaucoup moins de déchets, seront plus sûrs et pourront aussi être utilisés pour la production de radio-isotopes, pour la recherche sur les matériaux avancés pour applications spatiales, dans la télécommunication et la recherche de fusion.

MYRRHA sera un pôle d'attraction pour des programmes scientifiques internationaux et sera un outil important pour la formation de la future génération d'ingénieurs et scientifiques.

Le projet Myrrha est développé par SCK-CEN, centre d'études nucléaires de Mol

# Un réacteur Myrrha...culeux?

General characteristics	MYRRHA
Core barrel inner diameter	1,480 mm
Reactor vessel, inner diameter	6,030 mm
Height (cover not included)	8,860 mm
Primary coolant	LBE
LBE volume	150 m <sup>3</sup>
Secondary coolant	boiling water
Core inlet temperature	270 °C
Core average outlet temperature	400 °C
Maximum allowed bulk velocity	2.0 m/s
Nominal core power	50-100 MW <sub>th</sub>



[1. Reactor vessel](#)

[2. Guard vessel](#)

[3. Cover](#)

[4. Diaphragm](#)

[5. Heat exchangers](#)

[6. Primary pumps](#)

[7. Fuel storage zone](#)

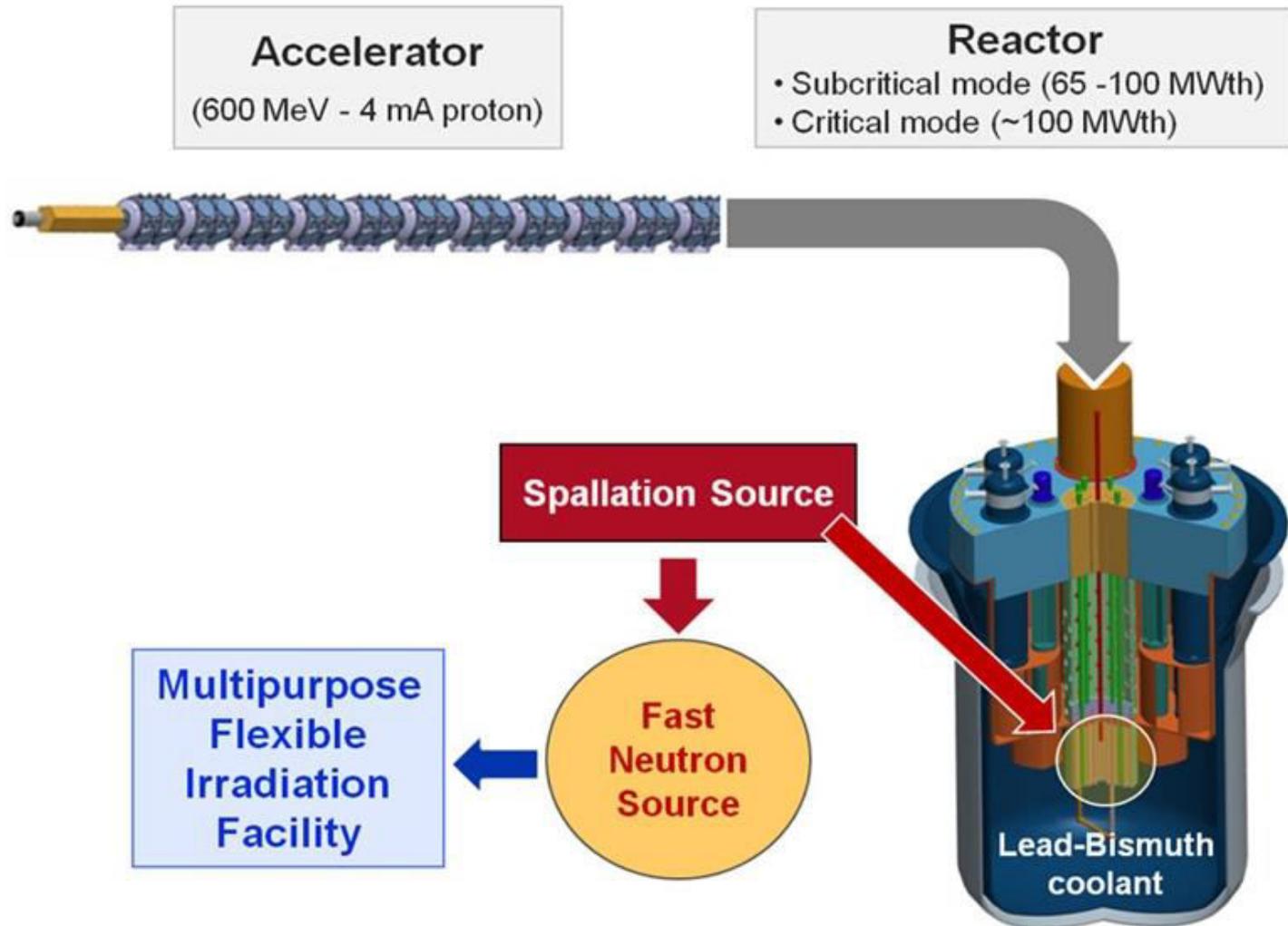
[8. Spallation target and core](#)

[9. Spallation loop](#)

[10. Fuel manipulators](#)



Overall view of the MYRRHA reactor with its main components.



### Spallation

La **spallation nucléaire** est une réaction nucléaire de fragmentation d'un noyau atomique en **nucléides** de **masse atomique** plus petite, par collision avec une particule incidente (neutron, proton,...) de grande énergie (de 100 MeV à quelques GeV).

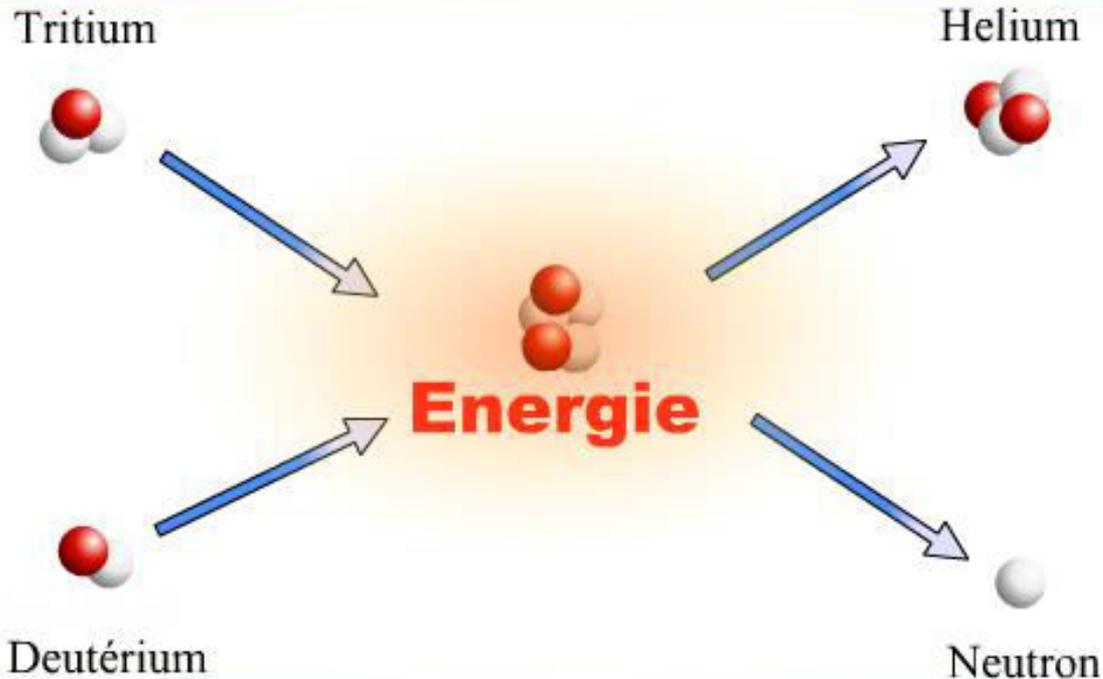
# La fusion



La nature utilise abondamment la fusion nucléaire dans les étoiles.

La fusion serait-elle **LA SOLUTION?**

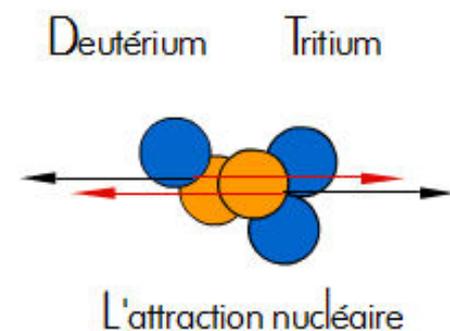
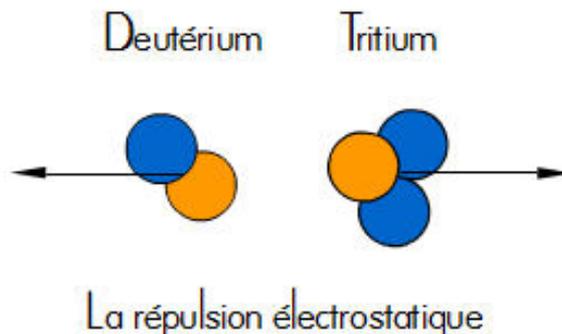
## Principe de la réaction de fusion



Si **deux grammes** de deutérium et **trois grammes** de tritium fusionnaient, le dégagement d'énergie serait de  $1,7 \cdot 10^{12}$  J soit autant que la combustion de **50 tonnes de charbon!** et donc **20 fois** l'énergie libérée par **un gramme** d'uranium 235.

# Sur le chemin de l'énergie de fusion

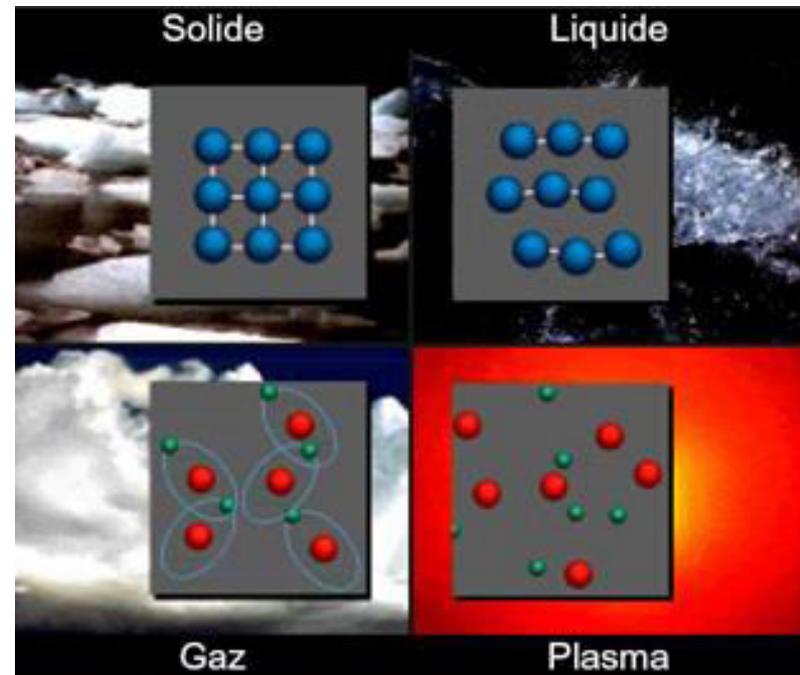
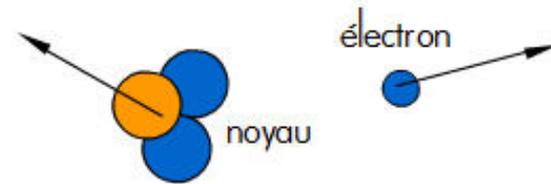
- Afin d'initier une fusion nucléaire, il faut rapprocher assez les deux noyaux qu'on veut fusionner. Or, ces noyaux étant formés de protons et de neutrons, sont chargés positivement. Leur interaction électrostatique commune les repousse.
- Cependant, très près du noyau agissent des forces d'attraction nucléaires plus importantes que les forces de répulsion électrostatique.
- Tout le problème est d'apporter assez d'énergie cinétique aux antagonistes pour les rapprocher suffisamment afin qu'une réaction de fusion nucléaire ait lieu et restitue de l'énergie. Or l'énergie cinétique est synonyme de température. En effet, la vitesse des particules est proportionnelle à leur agitation thermique. Il faut donc **augmenter la température** des particules afin de leur apporter plus de vitesse et leur permettre ainsi de s'approcher les unes des autres.



# Le quatrième état de la matière

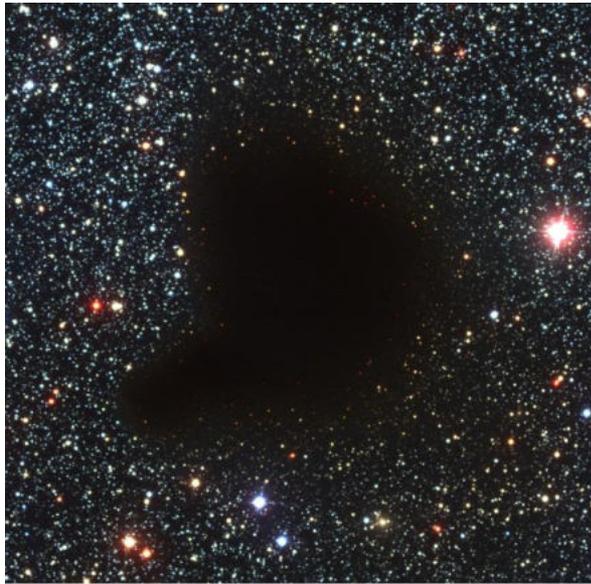
- Pour réaliser la fusion, il faut atteindre **100 millions de degrés**.
- A cette température, les électrons se séparent des noyaux et on obtient **un plasma**. C'est le quatrième état de la matière.

Le plasma



# Naissance d'une étoile

Sous l'effet de la gravitation, les nuages de matière se rassemblent et s'effondrent. La température augmente. La fusion peut commencer. Une nouvelle étoile est née.



ESO PR Photo 22a/99 (30 April 1999)  
The "Black Cloud" B68  
(VLT ANTU + FORS1)  
© European Southern Observatory

Nuages sombres moléculaires



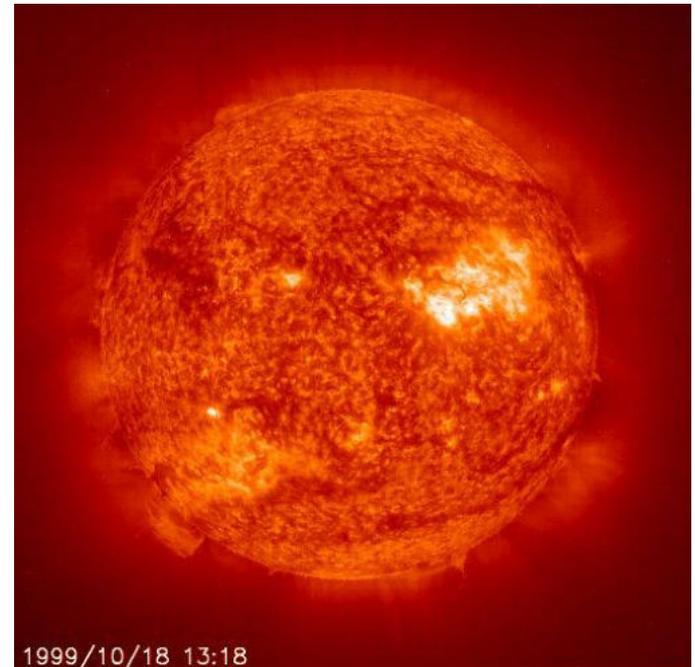
Proto-étoiles



Nouvelle étoile

# Le Soleil

Le soleil est une boule de plasma chaud et dense. En fusionnant, les atomes d'hydrogène qui le composent majoritairement se transforment en hélium. Ces réactions de fusion libèrent de grandes quantités d'énergie. La tendance du plasma à se disperser et à se refroidir est contrebalancée par la gravitation.



# Durée de vie du Soleil

Luminosité du Soleil :  $3.9 \times 10^{26} \text{ J/s}$

Masse du Soleil :  $2 \times 10^{30} \text{ kg}$

Quantité de matière qui disparaît à chaque seconde :

$$E = mc^2 \rightarrow m = \frac{E}{c^2} = \frac{3.9 \times 10^{26}}{(2 \times 10^8)^2} = 0.43 \times 10^{10} \text{ kg} = 4.3 \text{ millions de tons}$$

Chaque seconde  
4.3 millions de tons  
de matière se  
transforment en  
énergie.



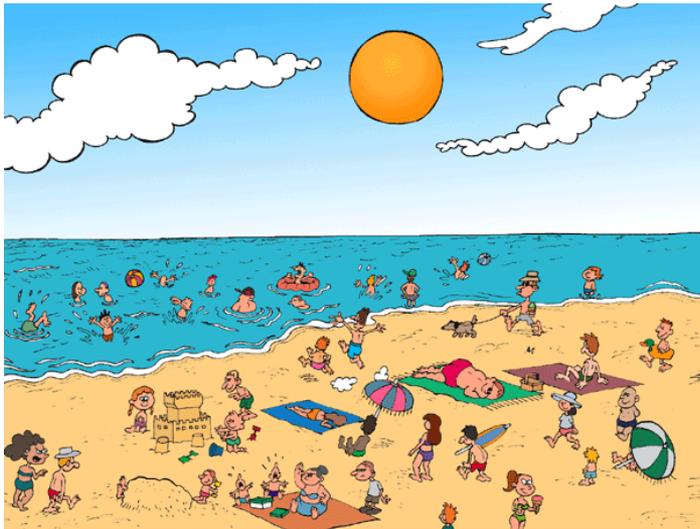
# Durée de vie du Soleil

Soit la réaction :  $4p \rightarrow {}^4\text{He}$  qui libère  $4.27 \times 10^{-12} \text{ J}$  par réaction

Donc par g d'hydrogène ( $p = H$ ) :  $\frac{4.27 \times 10^{-12}}{4} \times \frac{6 \times 10^{23}}{N_A = \text{Nombre d'Avogadro}} = 6.4 \times 10^{11} \text{ J}$

Quantité d'hydrogène qui se convertit par seconde :  $\frac{3.9 \times 10^{26}}{6.4 \times 10^{11}} \approx 0.6 \times 10^{15} \text{ g}$

Si le Soleil est 100% d'hydrogène et que 10% se convertit, la durée de vie du Soleil est d'environ :  $\tau = \frac{0.1 \times 2 \times 10^{33}}{0.6 \times 10^{15}} = 0.33 \times 10^{18} \text{ s} \approx 10 \text{ milliards d'années}$



Pas de problème, vous pouvez encore faire bronzette pendant quelques années.

# Et sur la Terre?

Sur Terre, les forces de gravitation sont insuffisantes et il est impossible d'obtenir une réaction de fusion entre deux atomes dans ces conditions. Il n'est pas envisageable, non plus, de confiner un plasma atteignant plusieurs millions de degrés à l'aide de parois matérielles.



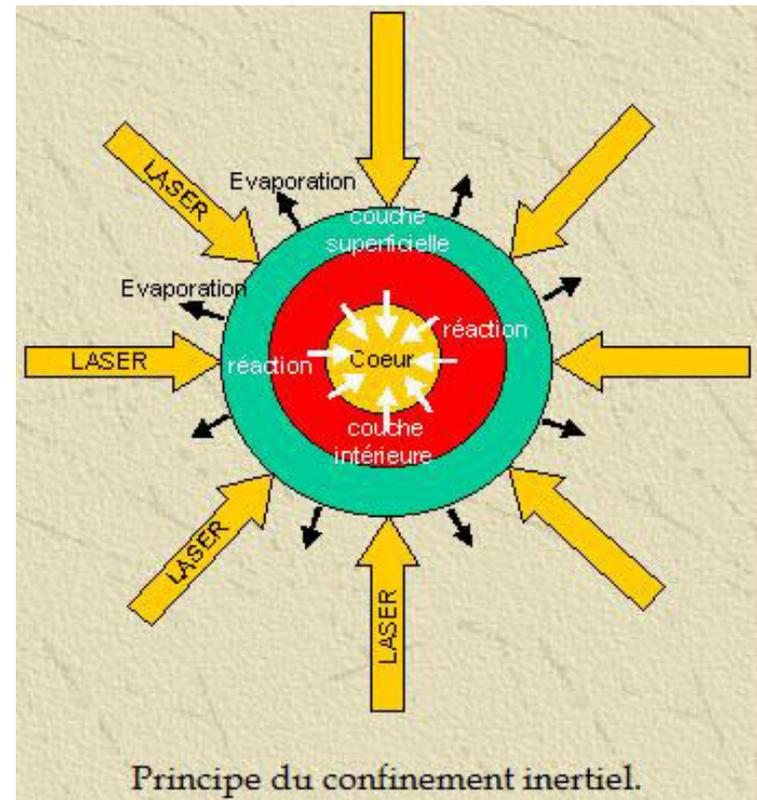
# Deux techniques possibles



- Deux voies font l'objet de recherche
  - Le **confinement inertiel** qui utilise des puissants lasers pour essayer de reproduire les conditions des étoiles, autrement dit, on cherche à densifier le plasma.
  - Le **confinement magnétique** où on cherche à augmenter le temps de confinement.

# Confinement inertiel

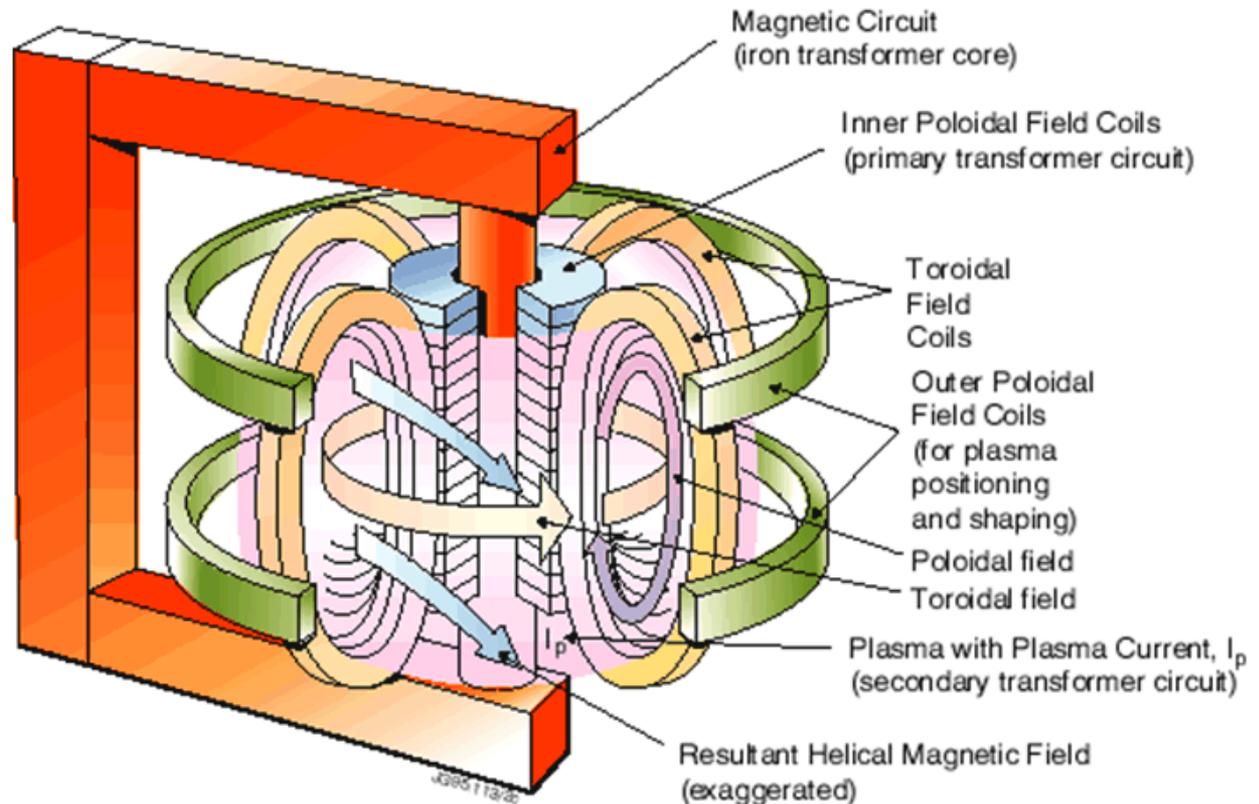
L'idée de base consiste à faire converger des faisceaux laser très puissants (ou des faisceaux de particules accélérées) vers une minuscule bille de verre contenant un mélange de deutérium et de tritium. L'impact des lasers sur la surface de la bille a pour effet de volatiliser violemment la couche superficielle de la capsule de verre. Par réaction, les couches intérieures sont fortement contractées au point de provoquer la fusion du deutérium et de tritium contenus dans la bille. La densité du plasma obtenue dans le cœur de la bille atteint les environs de  $10^{30}$  particules par  $m^3$  – soit dix mille fois la densité du deutérium ou du tritium solides – pendant un temps très court de l'ordre de 100 picosecondes ( $10^{-10}$  s).



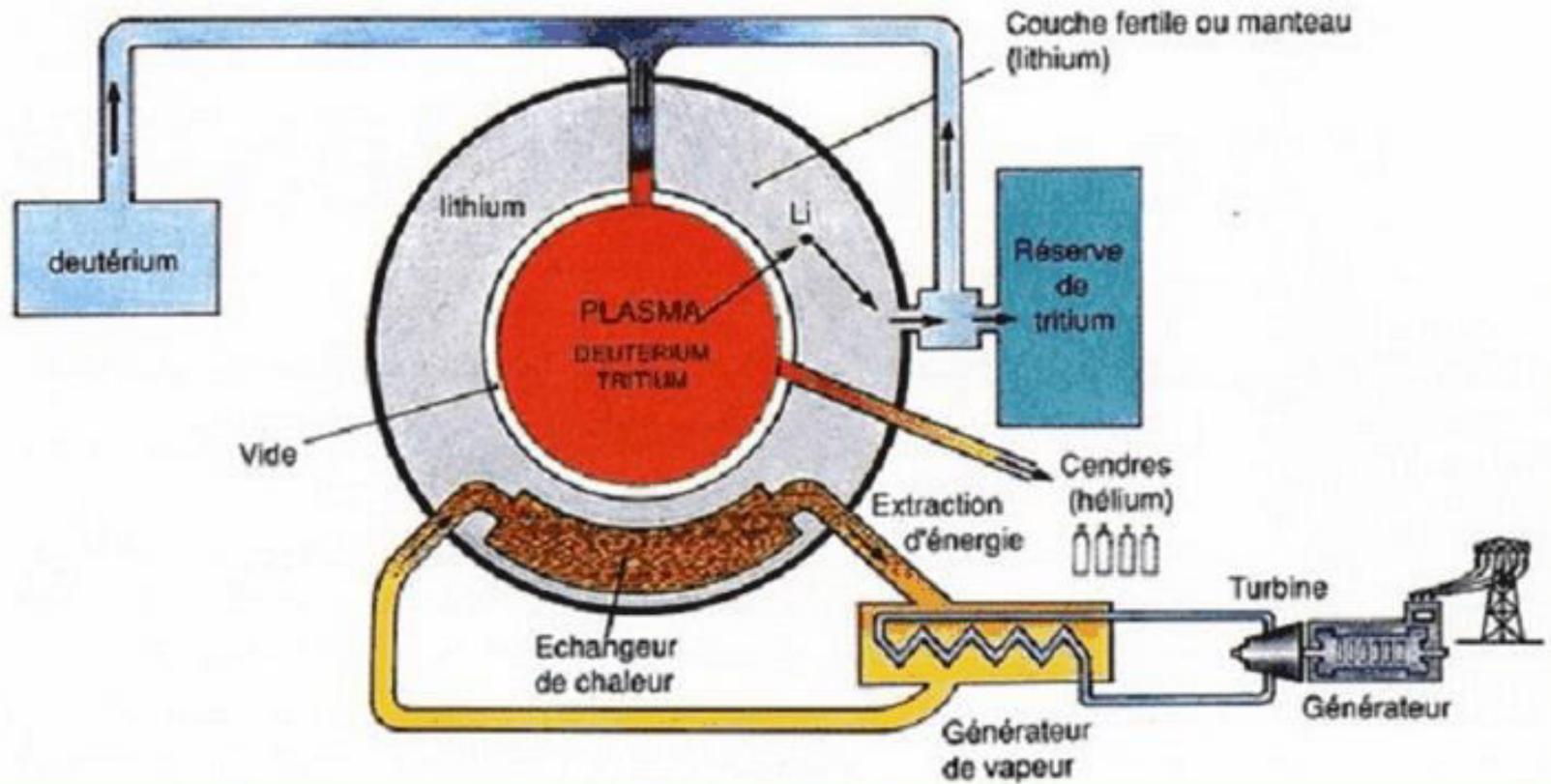
# Le confinement magnétique

Les chercheurs ont mis à profit les propriétés du plasma et ont pensé à le maintenir dans une « boîte immatérielle ». Ils ont compris comment utiliser la propriété des particules du plasma qui ont tendance à s'enrouler autour des lignes de champ magnétique et à les suivre dans leur trajectoire.

En refermant les lignes de champ magnétique sur elles-mêmes, ils sont ainsi parvenus à mettre au point le concept du **tokamak** (Acronyme russe de Toroidalnaya Kamera c Magnitnymi Katushkami) à la fin des années 60.



## SCHEMA DE PRINCIPE D'UN REACTEUR DE FUSION



# ITER : International Thermonuclear Experimental reactor

Construit selon ce concept, Iter (le chemin en latin) sera la plus grande installation de recherche du monde destinée à prouver que la fusion pourrait devenir une source d'énergie à l'horizon 2050.

## Objectifs

$P_{\text{fus}}$  500MW

Durée 500s

$Q = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$  10

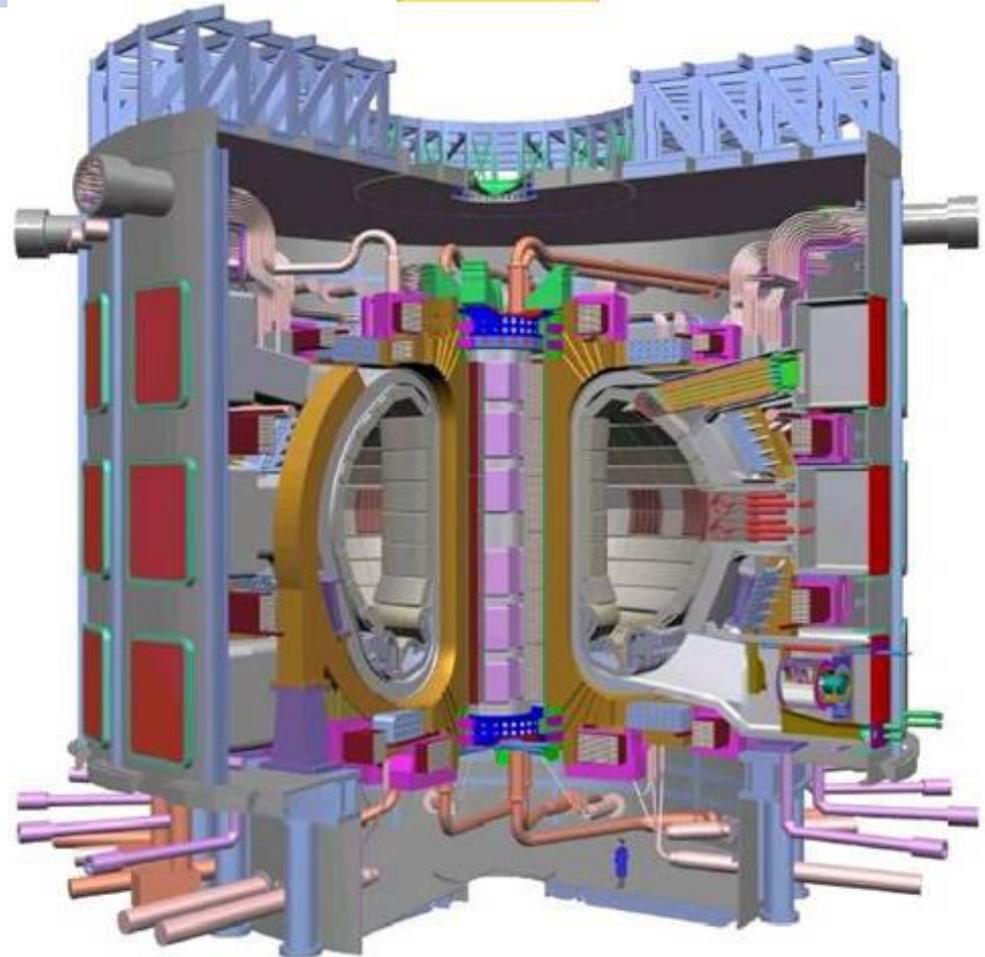
## Paramètres

Grand rayon 6.2m

Courant plasma 15MA

Bobines

supraconductrices



Construction : 5 milliards d'Euros sur 10 ans  
Exploitation : 5 milliards d'Euros sur 20 ans

# Avantages de la fusion



## Efficacité de la fusion

- 1g D + 1.5g T = 1kg d'Uranium = 24 tonnes charbon
- 1 bouteille de Deuterium = 60 camions de 40 t de charbon !

## Grande quantité de combustible disponible

- il y a 1 D pour 6500 H dans l'eau ( $H_2O$ )
- 1l d'eau contient => 0.034g D (300 l. pétrole)
- Eau sur Terre: 1'500'000'000'000'000'000 de litres
- Quantité de deutérium pour 50 millions d'années
- Quantité de lithium pour de nombreuses années aussi

## Bonne répartition géographique du combustible

## Peu de combustible dans le réacteur

## Pas de réaction en chaîne

- Ne peut pas s'emballer, pas de plan d'évacuation

# Inconvénients de la fusion



- Technique non prouvée
- Nécessité de mettre de nouveaux matériaux (Aciers résistants aux neutrons, etc).
- Coût du projet
- Complexité et lenteur d'exécution.
- Vraiment pas de déchets radioactifs?
- Technologie sera réservée aux pays riches et développés.
- Nécessité de produire du tritium. Ce qui n'est pas sans danger.
- L'énergie produite sera en une telle quantité que son transport et sa distribution seront complexes.



**L'avenir vous  
appartient.**

**Il ne se fera pas  
sans vous.**

**Au boulot!**

Elle a  
besoin de  
vous. Ne la  
laissez pas  
tomber!

