



Energie

Energies renouvelables

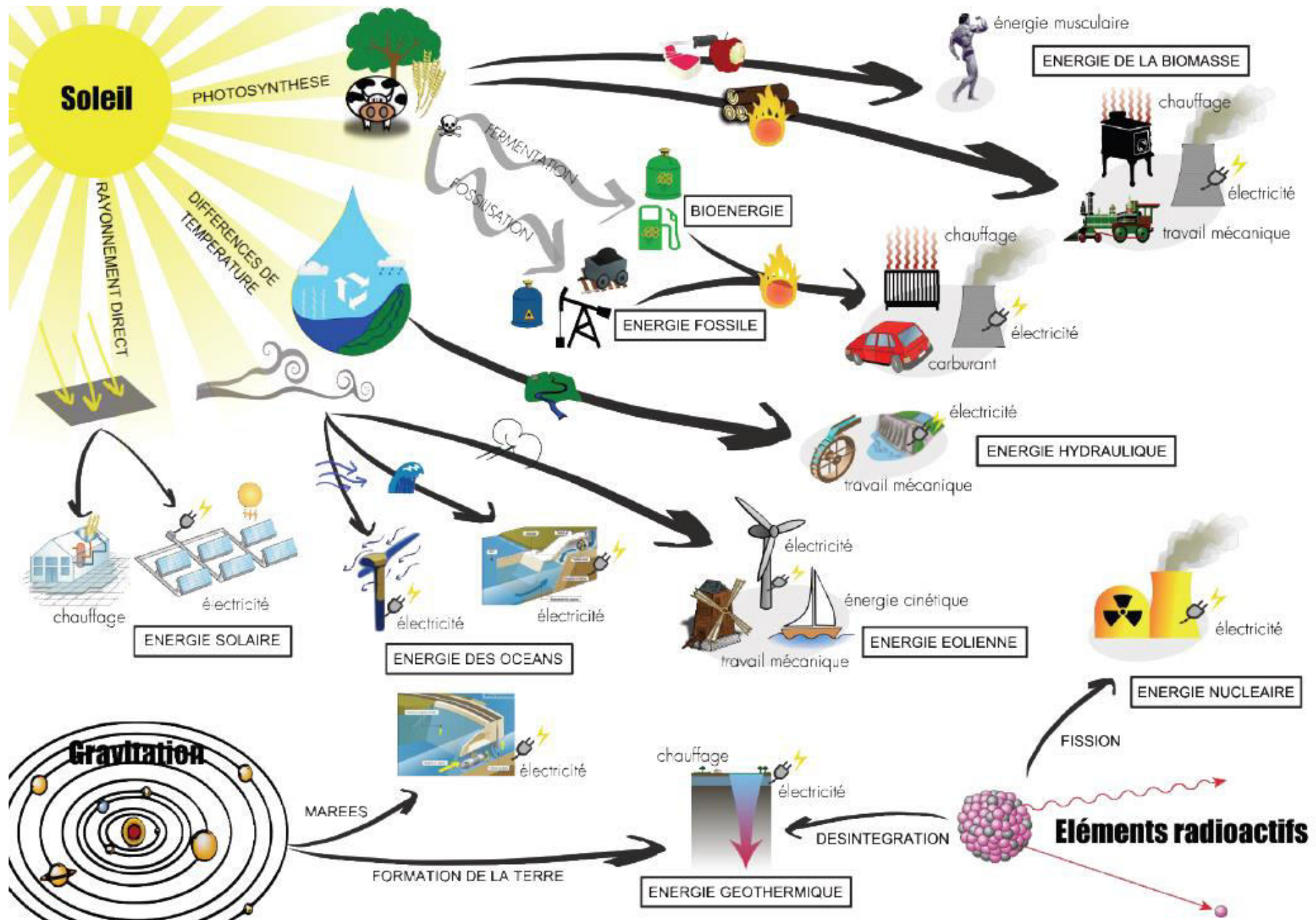
Energie nucléaire

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.

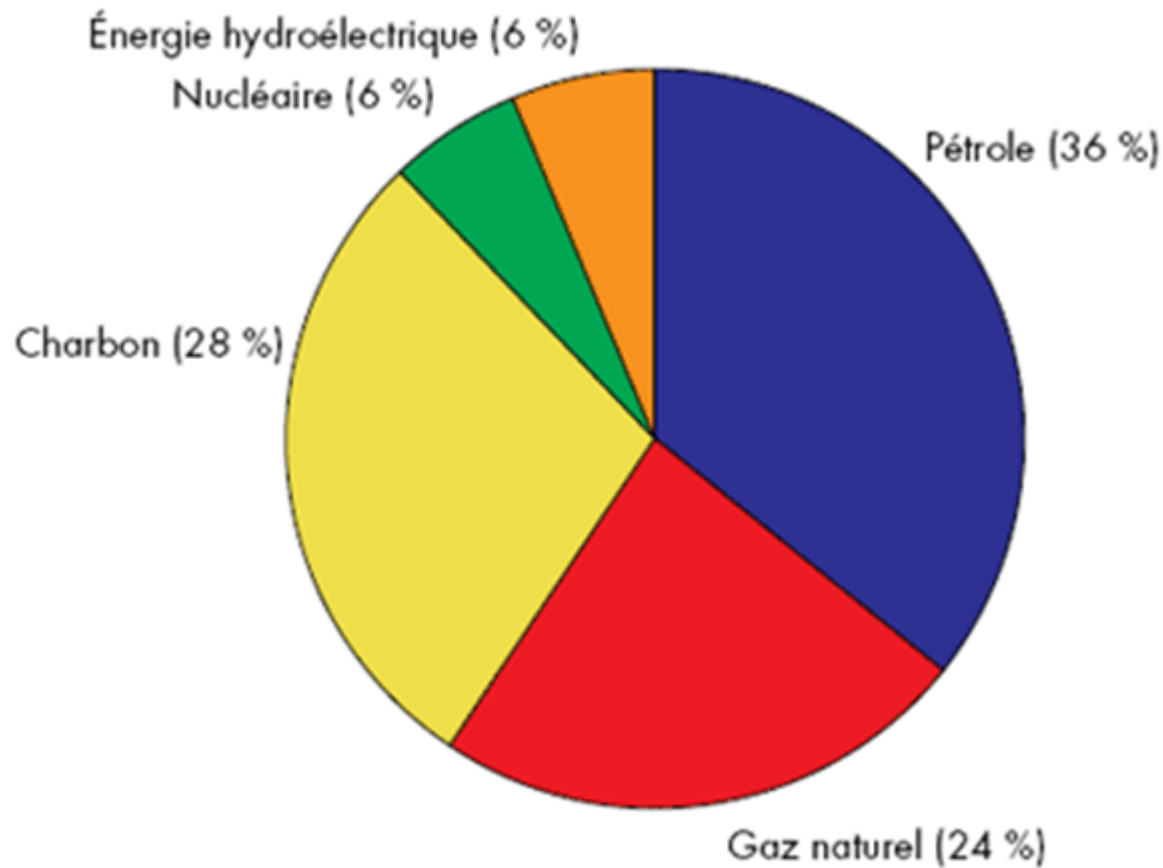
Les différentes formes d'énergie





La consommation d'énergie

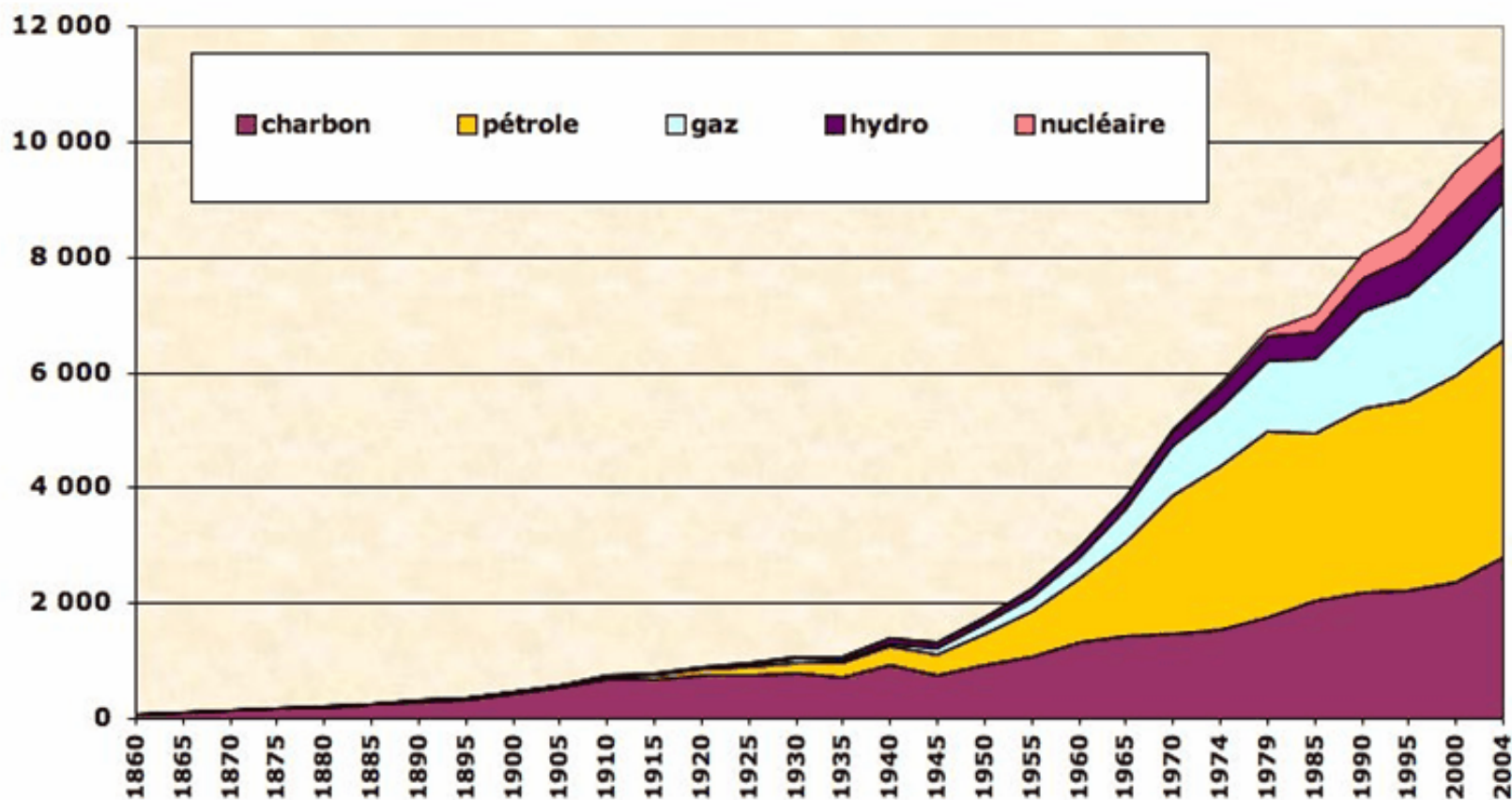
Consommation mondiale d'énergie primaire selon le combustible, 2006



Source : BP Statistical Review of World Energy, 2007

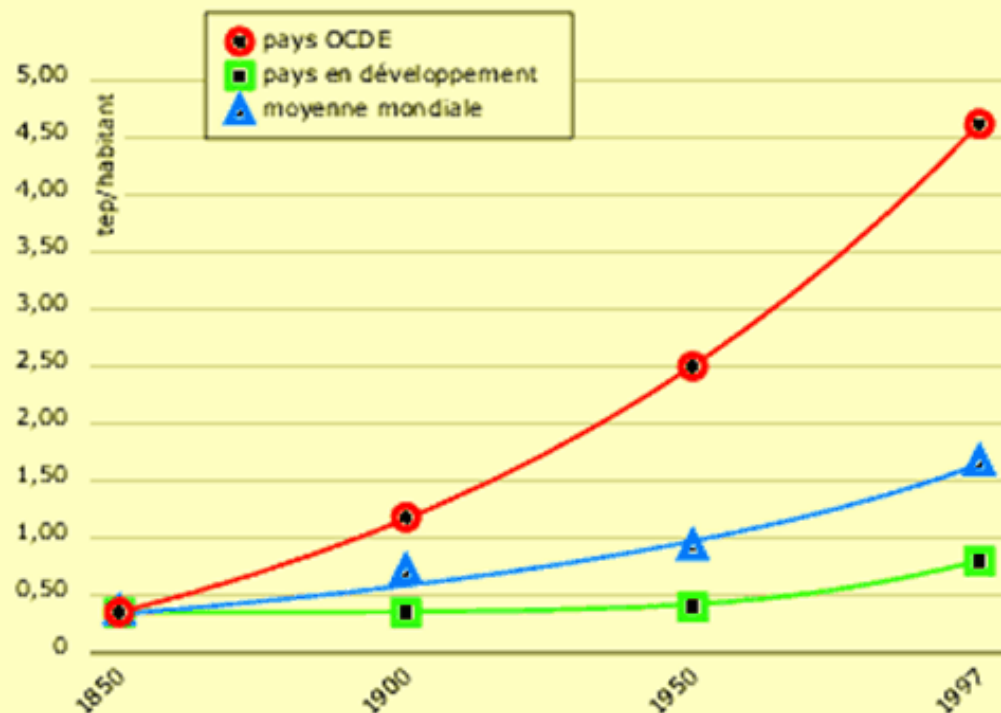
Le problème de l'énergie

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*.

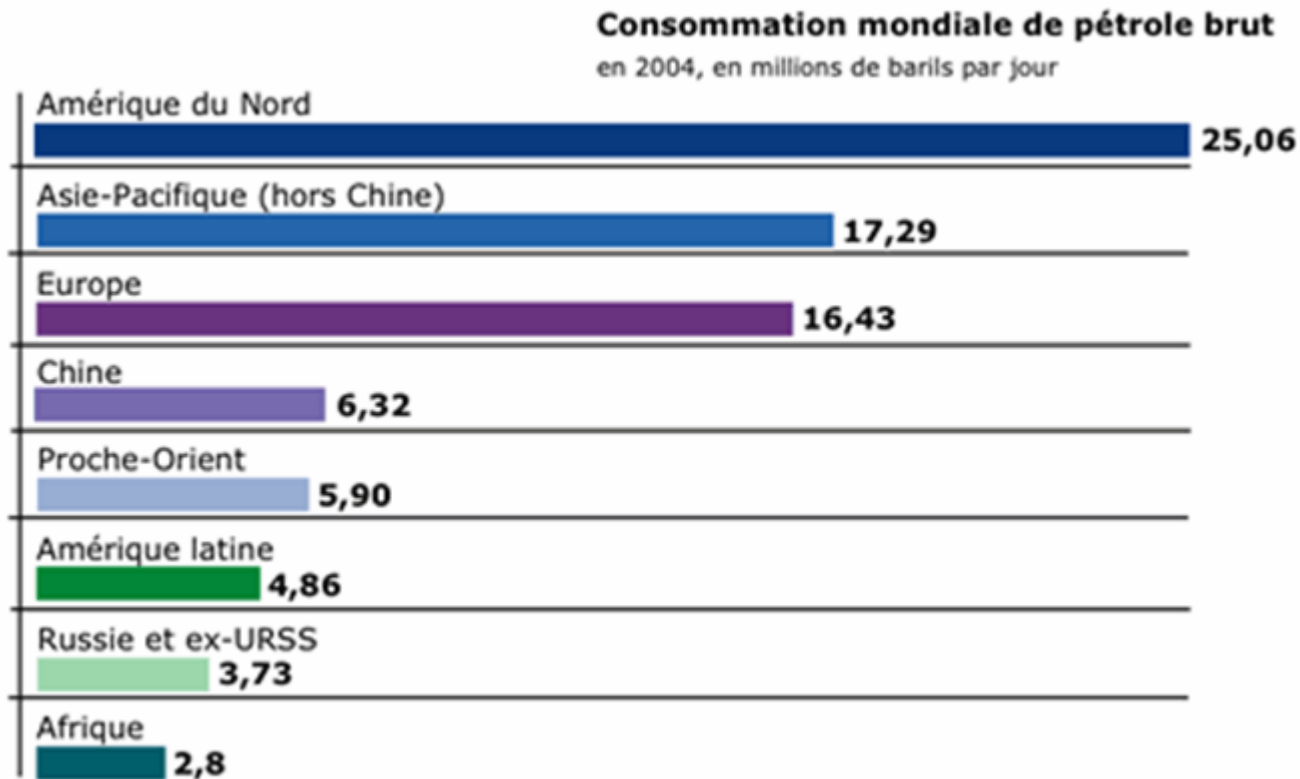
Tableau 2.1

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



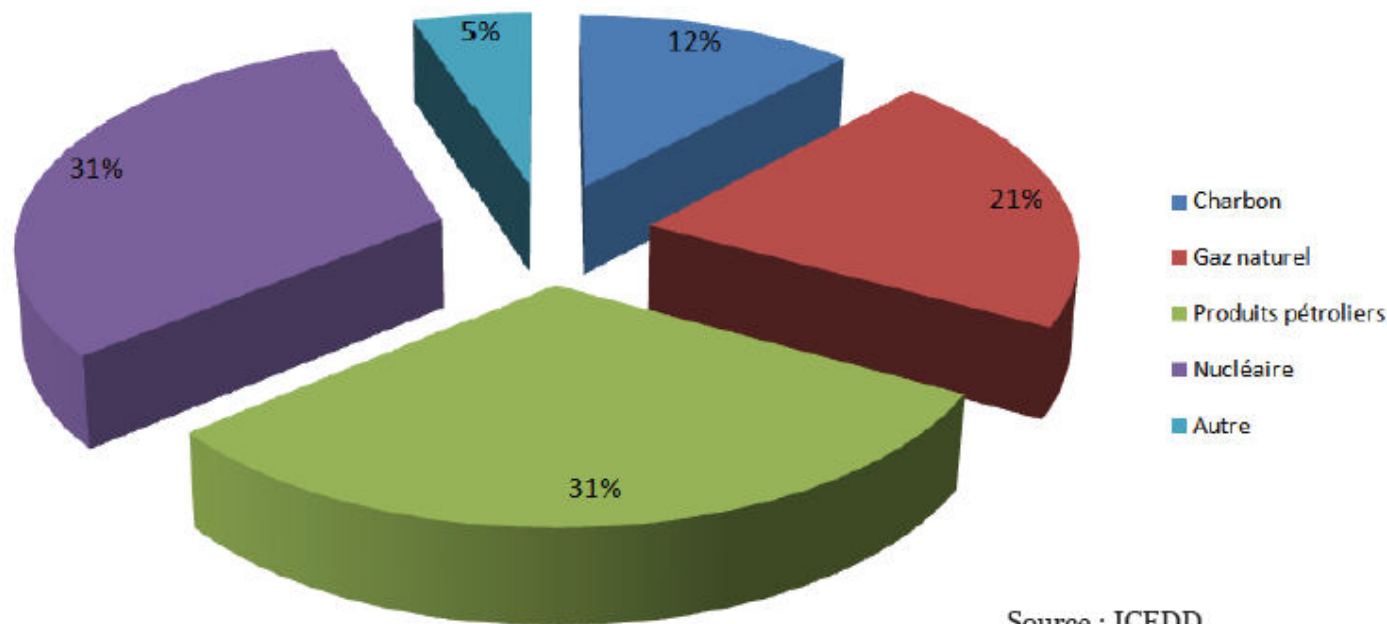
Les $\frac{3}{4}$ des ressources sont consommés par $\frac{1}{4}$ de la population



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**.

Réserves 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...**

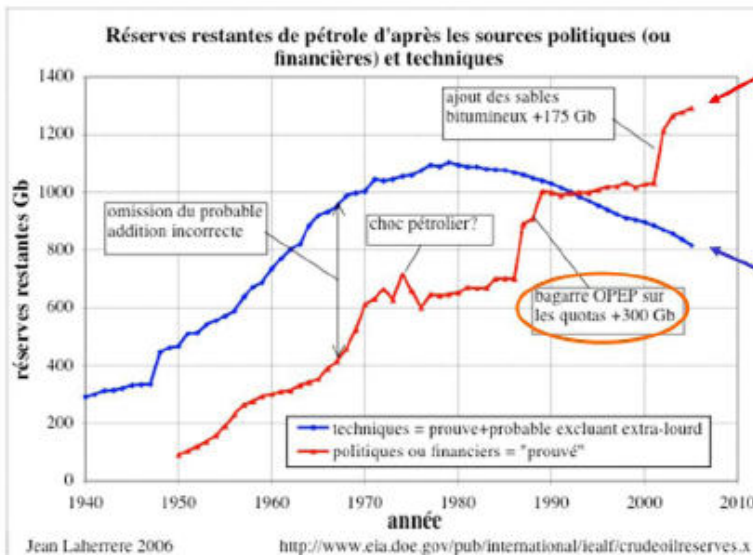
Les réserves de pétrole sont basées sur des estimations. Les géologues donnent donc une fourchette de 3 valeurs :

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)

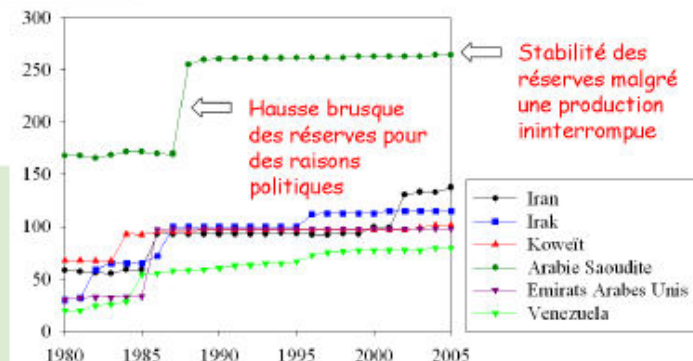
Les réserves qu'on espère extraire du sous-sol (= 2P)

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...

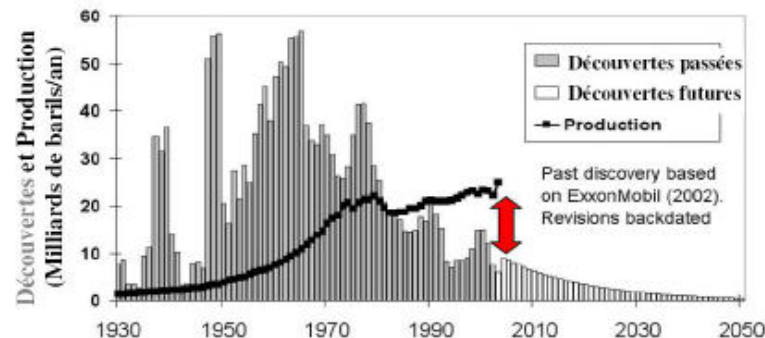
Réserves "politiques" ?

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.



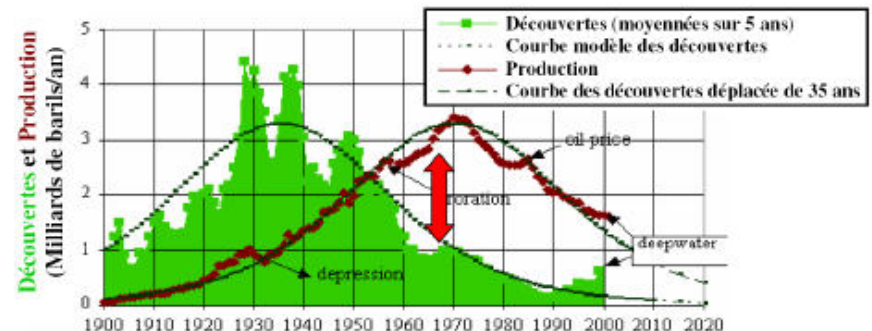
Découvertes et production

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 découvriions 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.

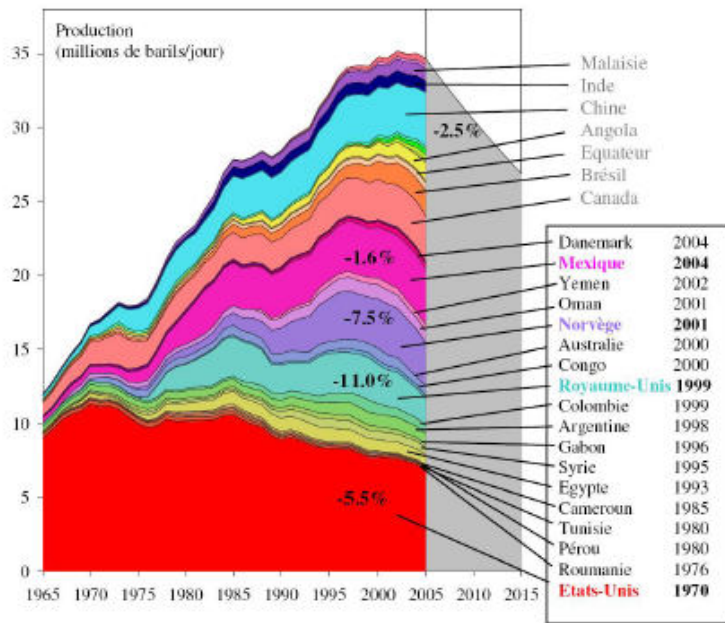
Inverser la tendance ?

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

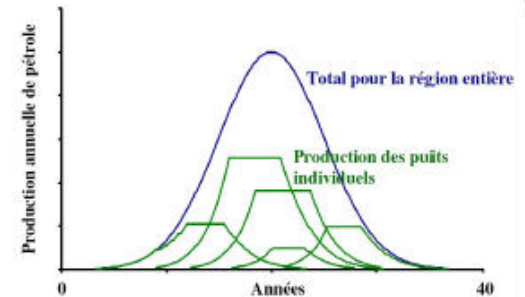
Pétrole, le début de la fin

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.



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.

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.

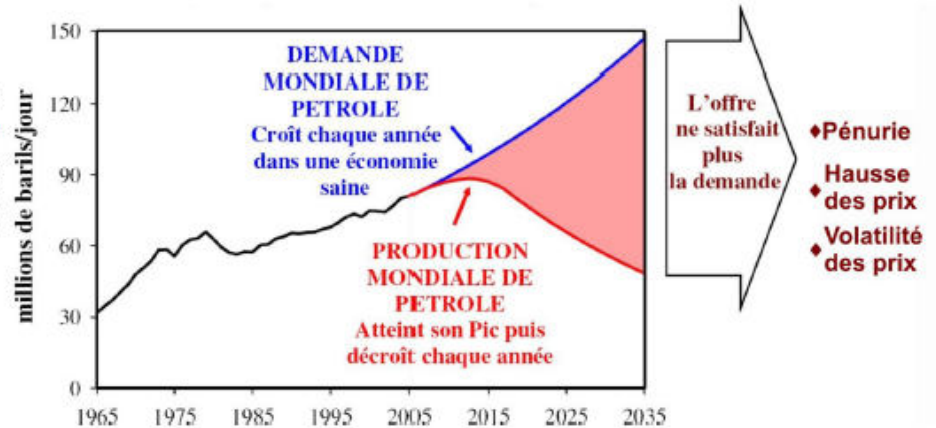
Et le gaz ?

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**.

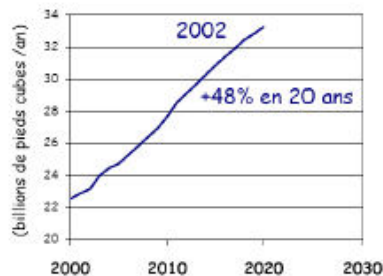


Un cas d'école : la crise du gaz nord-américain

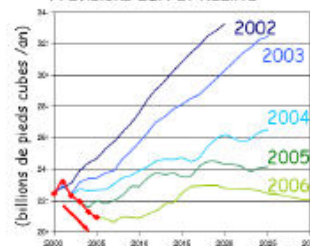
Le 'pic du gaz nord-américain' est un excellent modèle qui permet d'évaluer le passage du Pic mondial du pétrole.

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**.

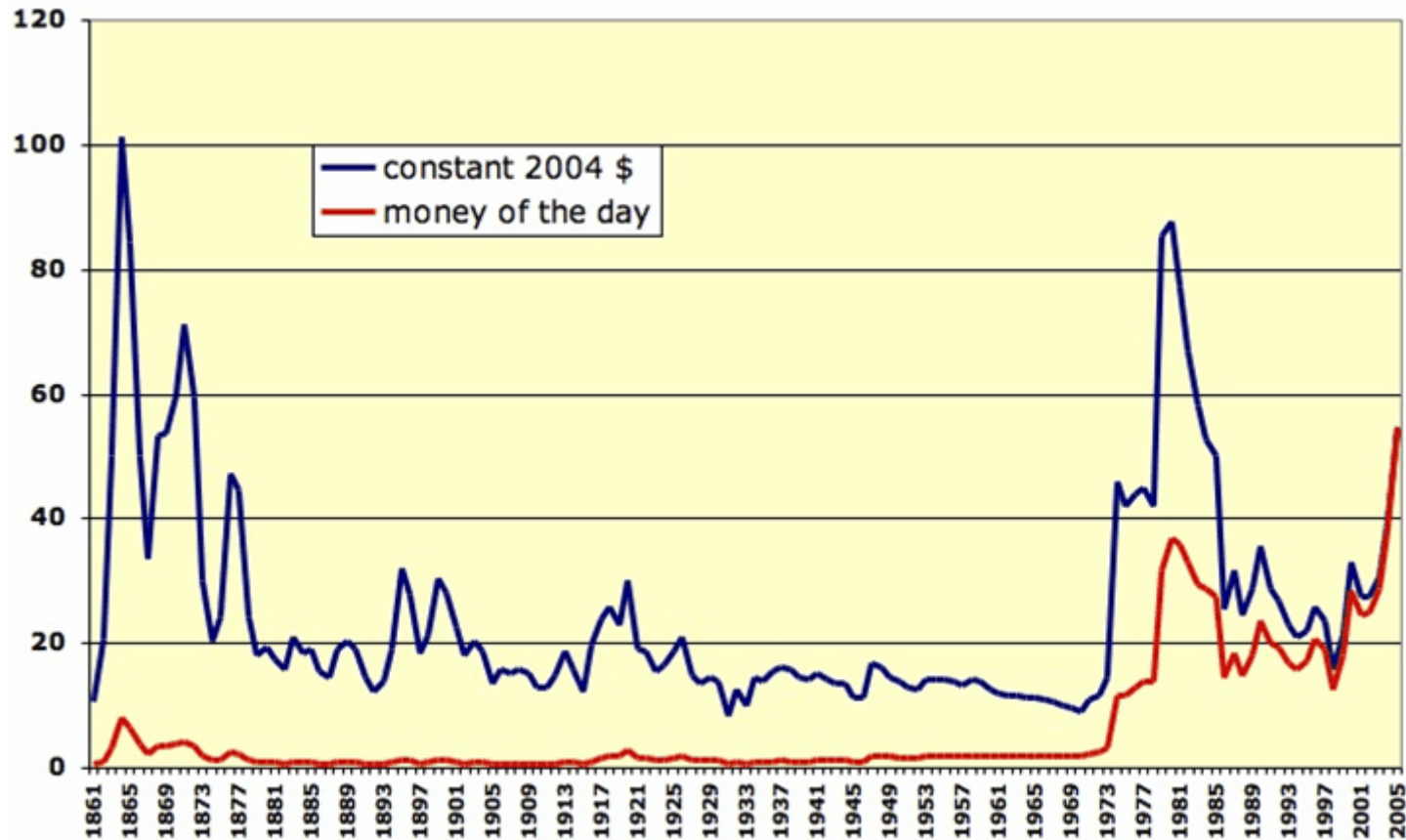
Prix du gaz naturel aux USA (\$/1000 pieds cubes - NYMEX)



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



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.

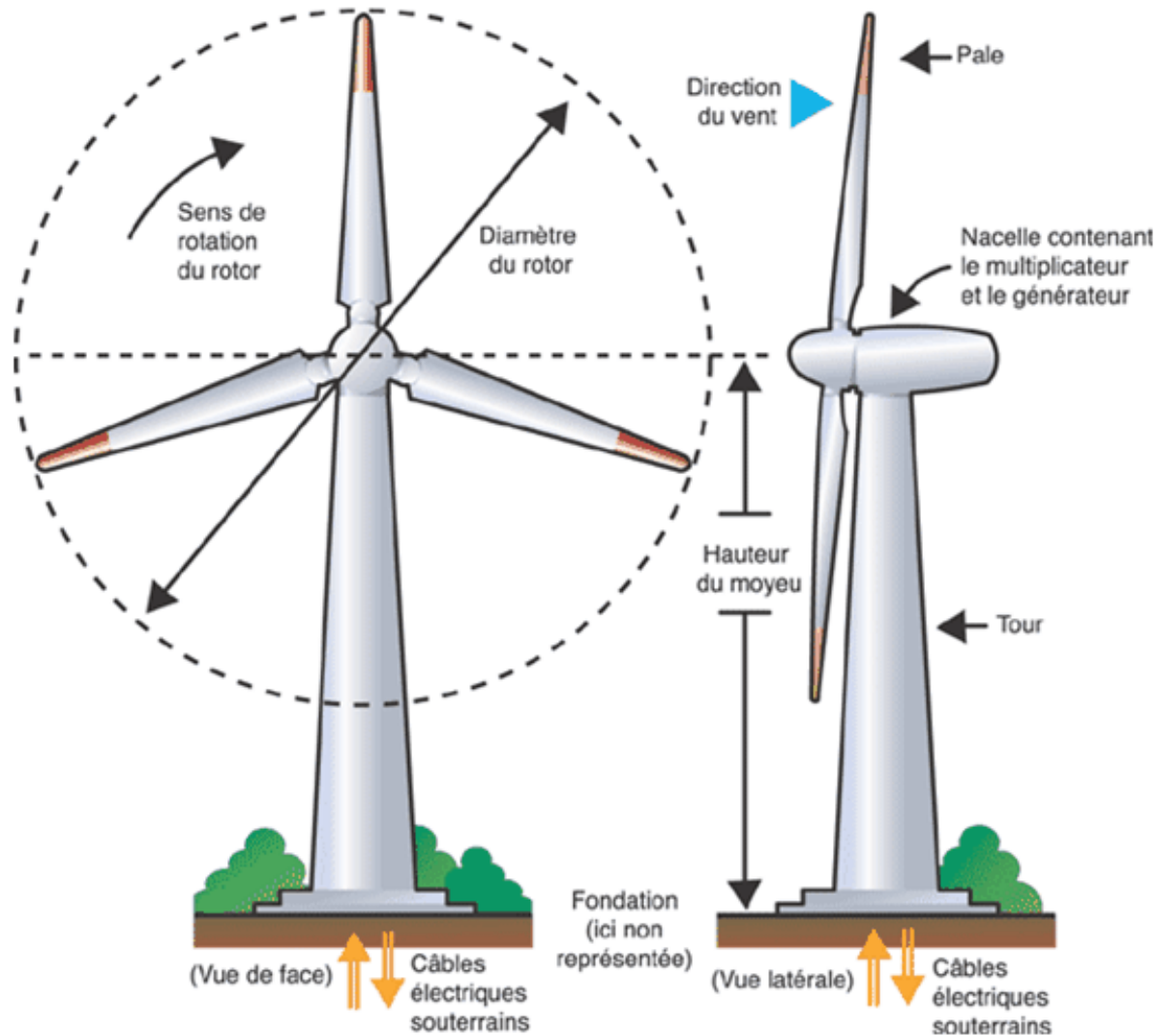


Les énergies renouvelables.

Source d'énergie renouvelable	Energies renouvelables	Forme utile d'énergie
Vent	Eolienne sur terre et en mer Eolienne de pompage	Electricité Travail
Cours d'eau Marée - Vague - Courant marin	Centrale hydroélectrique, Centrale marémotrice, Centrale marine	Electricité
Soleil	Chauffe-eau solaire, (Séchoir et four solaire) Syst. photovoltaïque, Centrale thermodynamique Réfrigération solaire	Chaleur Electricité Froid
Biomasse sèche Biomasse humide	Equipement de combustion Unité de biométhanisation-combustion Equipement d'extraction -> Biocarburant	[Combustible - Chaleur - électricité] Carburant
Chaleur « naturelle » (géothermique, océanique ou solaire indirect)	Bat énerq perf (Arch climatique) Pompe à chaleur Puits géothermique	Réduction consom. Chaleur Chaleur (électricité)

Nous parlerons uniquement de l'énergie éolienne comme exemple.

Schémas d'ensemble d'une éolienne

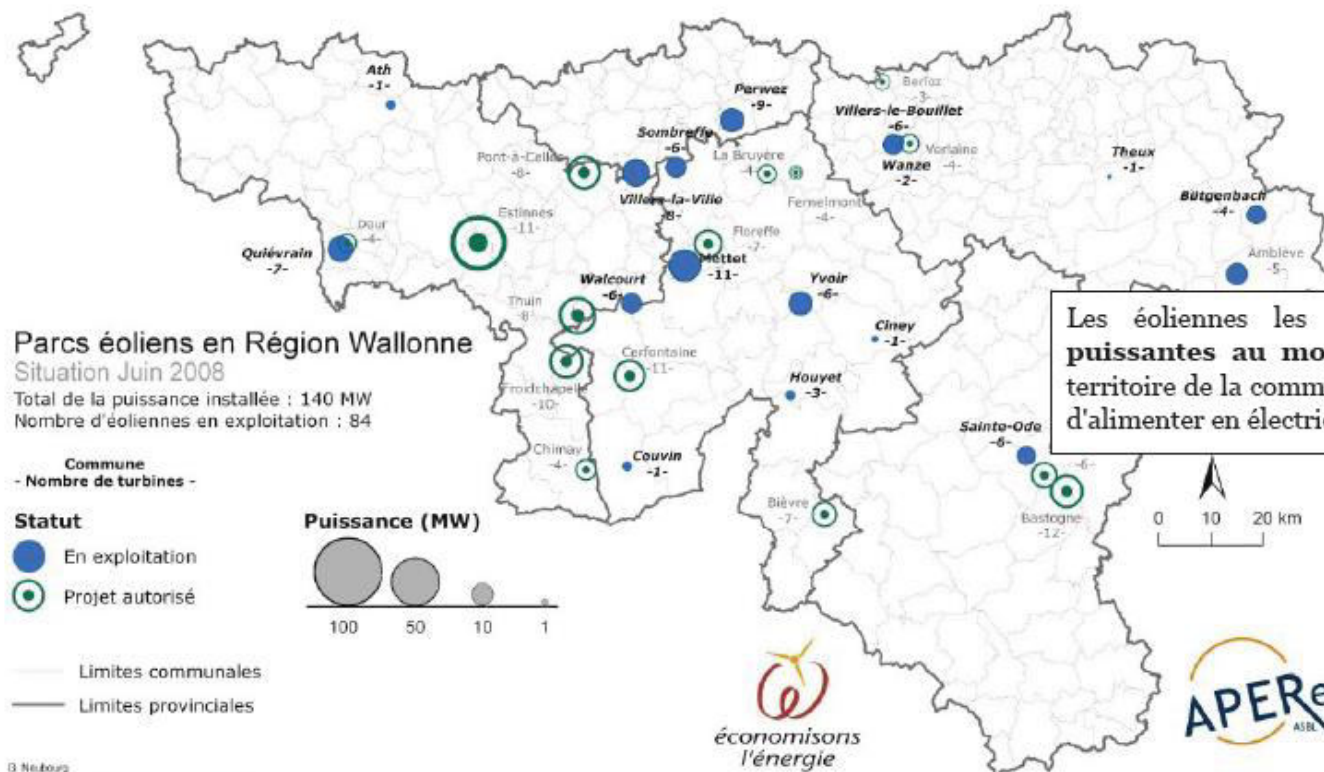




La Wallonie ne manque pas de souffle



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.



« 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 km², 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 km² de panneaux photovoltaïques**;
- soit environ **3,3 millions de km² 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?

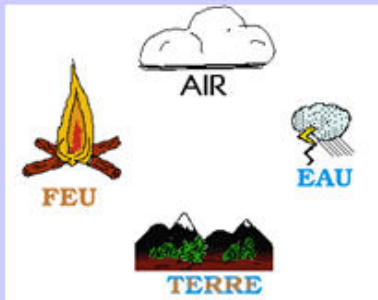
Pour donner des éléments de réponse, nous allons étudier

- 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?



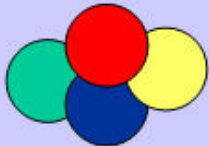
L'atome

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



VI^{ème} et V^{ème} siècle av. J.C.

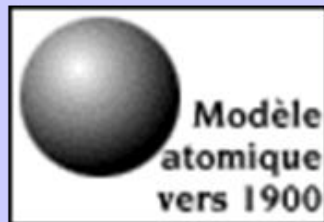
Thalès et Anaximène



V^{ème} siècle av. J.C.

Leucippe et Démocrite

atomes: ατομος



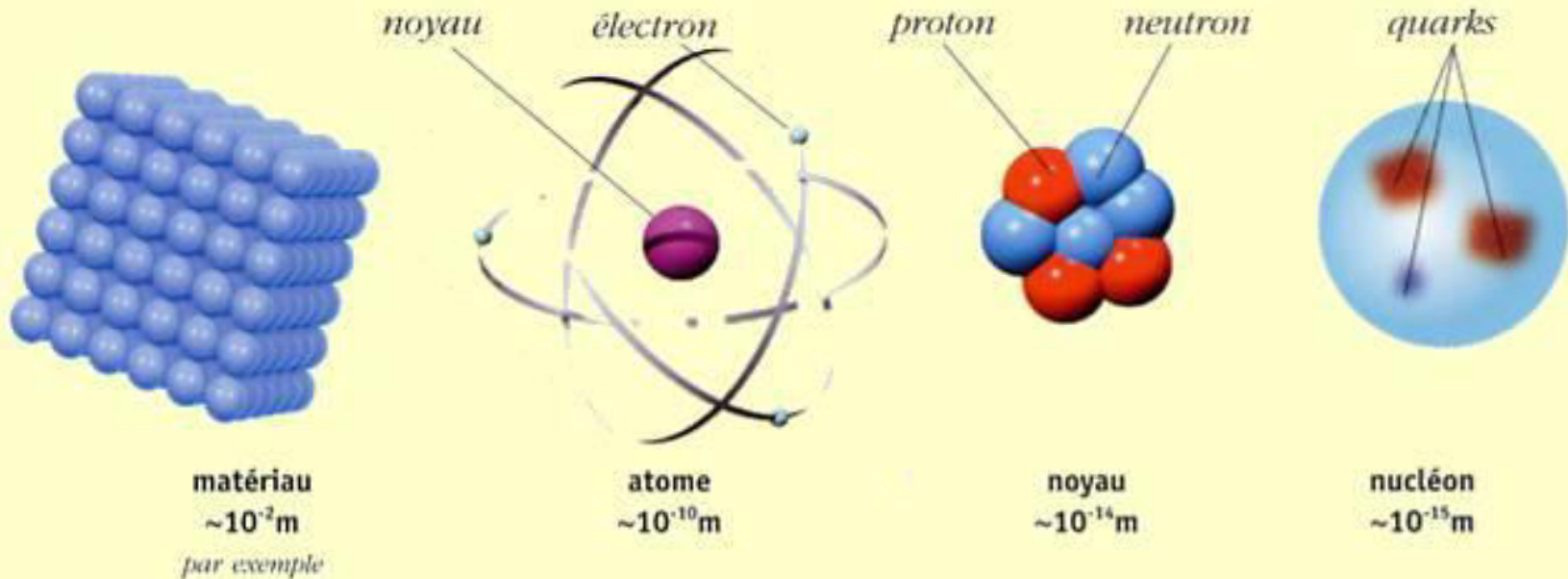
XIX^{ème} siècle

J. Dalton: théorie atomique

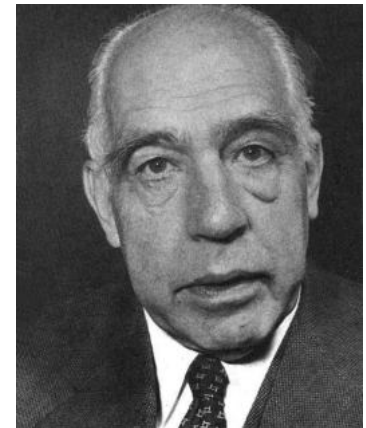
D.I. Mendeleïev: tableau
périodique



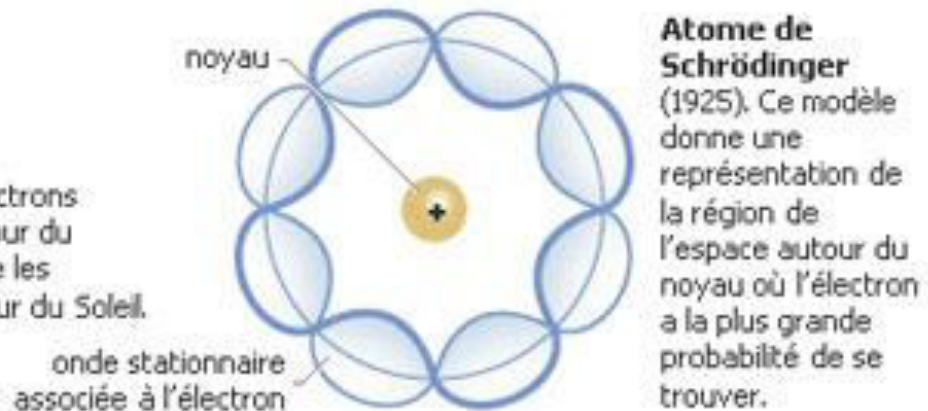
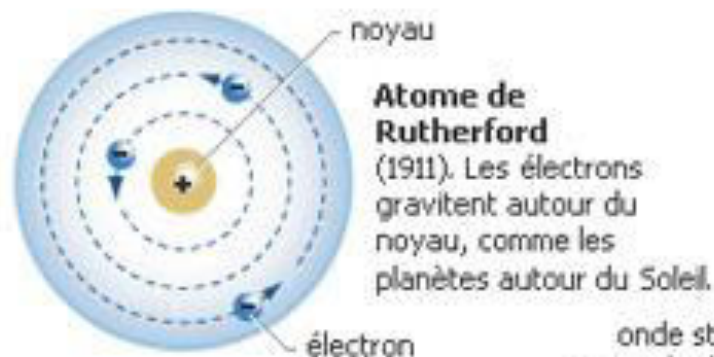
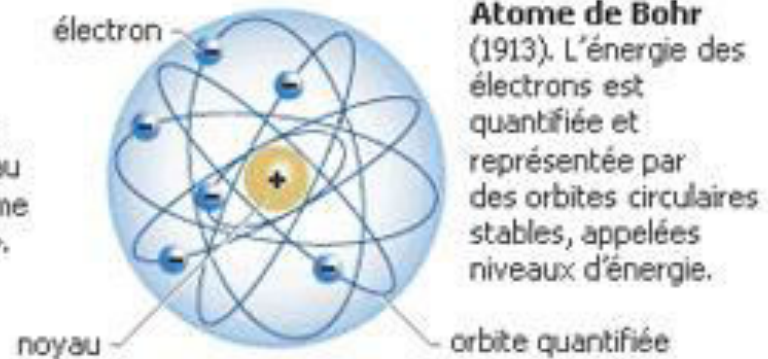
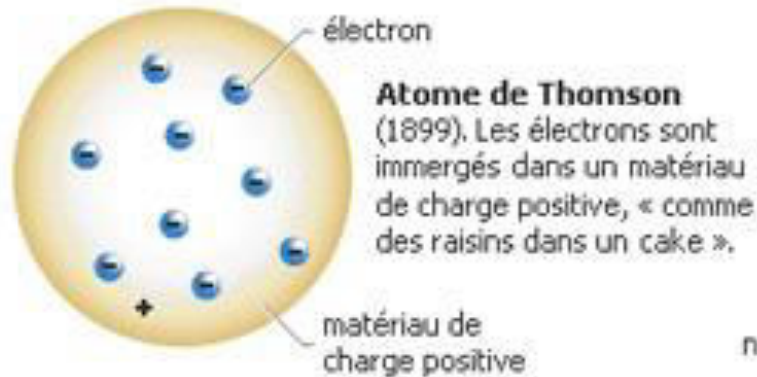
LA STRUCTURE DE LA MATIÈRE



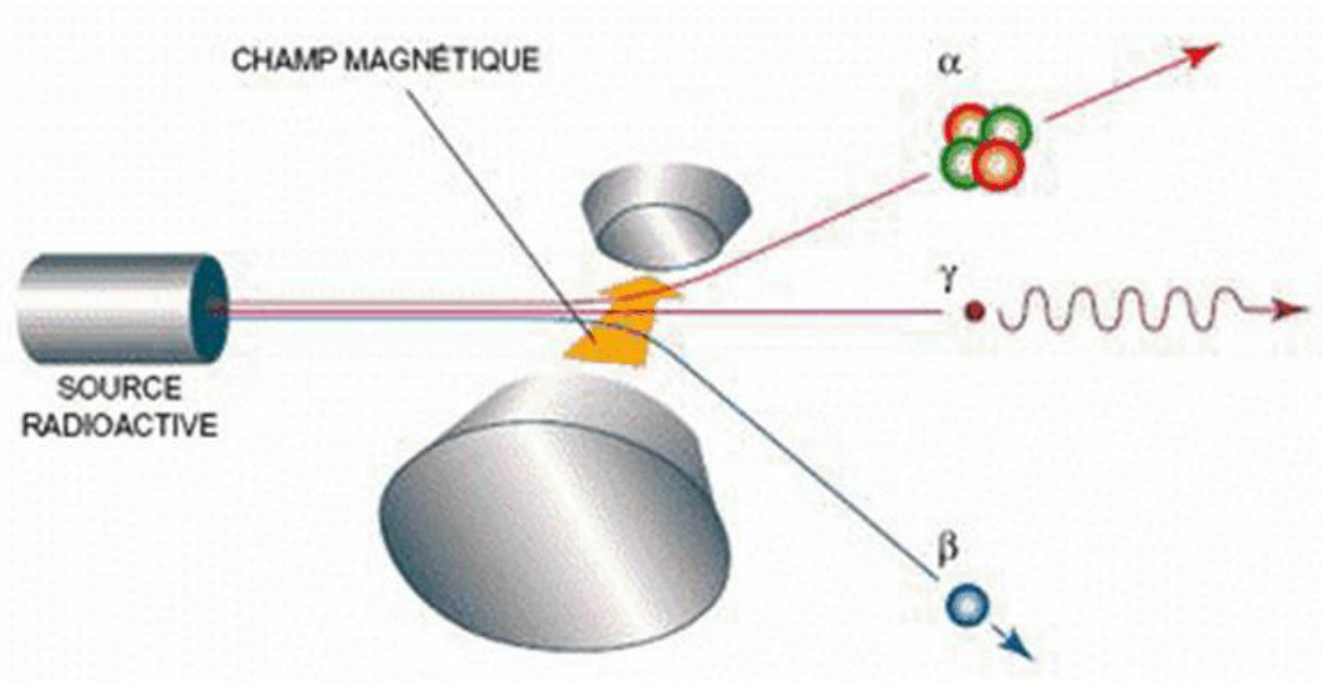
Niels BOHR nait a Copenhague le 7 Octobre 1885. De 1913 a 1915, il élabore, a partir du modèle atomique de Rutherford, la première vision quantique de l'atome: un modèle ou les orbites des électrons autour du noyau atomique sont quantifiées: un atome ne peut émettre ou absorber de la lumière qu'en faisant 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



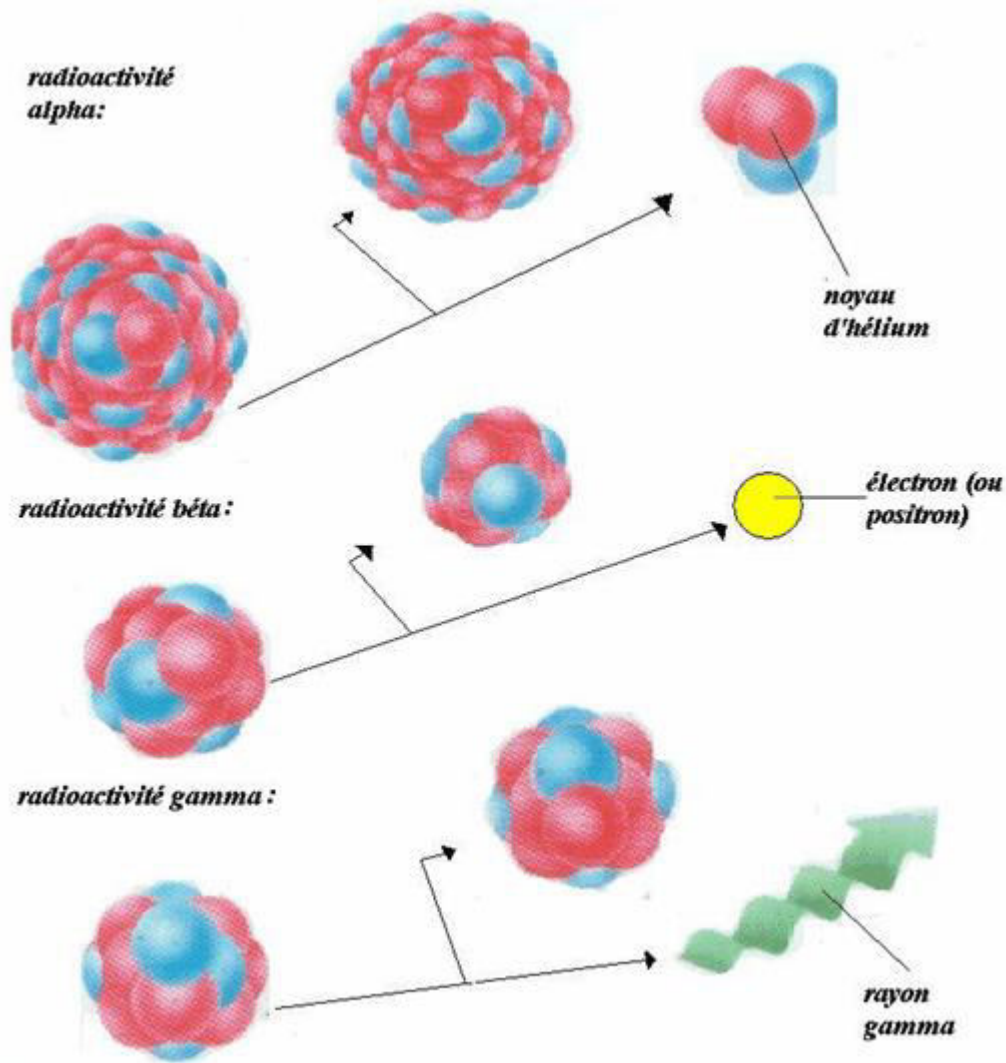
La radioactivité



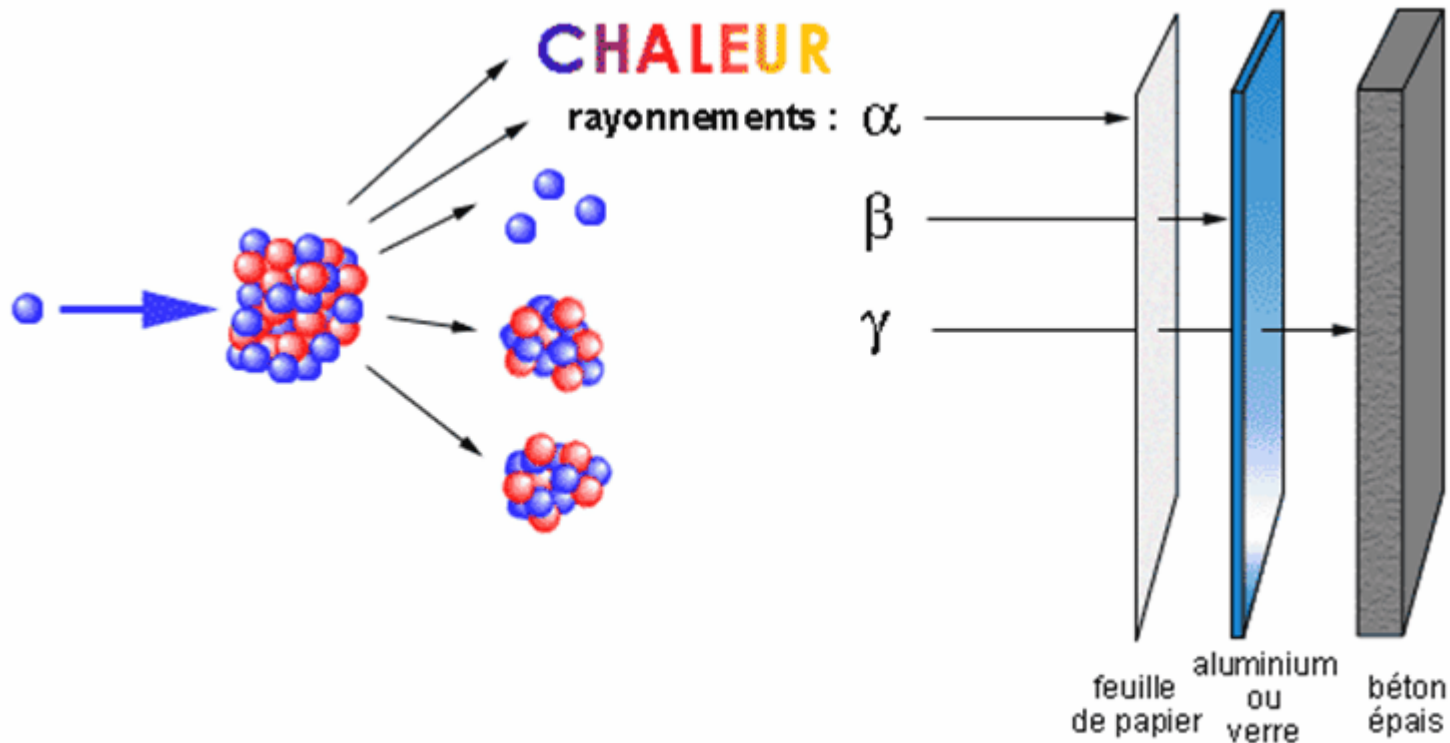
Antoine Henri Becquerel, physicien français, (1852 – 1908) . En 1896, Becquerel découvrit la radioactivité par accident, alors qu'il faisait des recherches sur la fluorescence des sels d'uranium



Les rayonnements



Les rayonnements



Rayonnements émis lors d'une fission

Les rayonnements

Nature	Vitesse	Masse au repos	Energie	Risques	Protection
α	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.
β	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.
γ	300000 km/s	0	0.04 à 10 MeV	Très dangereux car très pénétrants. Faible pouvoir d'ionisation. Dégâts internes.	2 à 5 cm de plomb ou 1 à 2 m de béton.

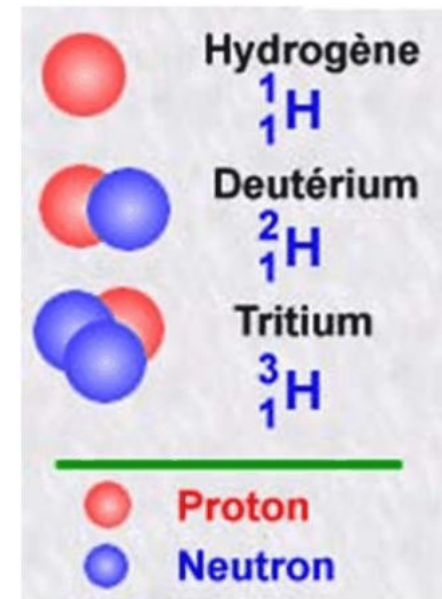
$$1 \text{ J} = 6,25 \cdot 10^{12} \text{ MeV}$$

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

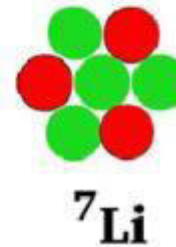
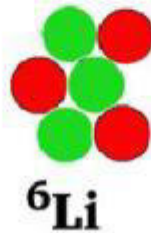
Hydrogen
1 proton



Helium
2 protons

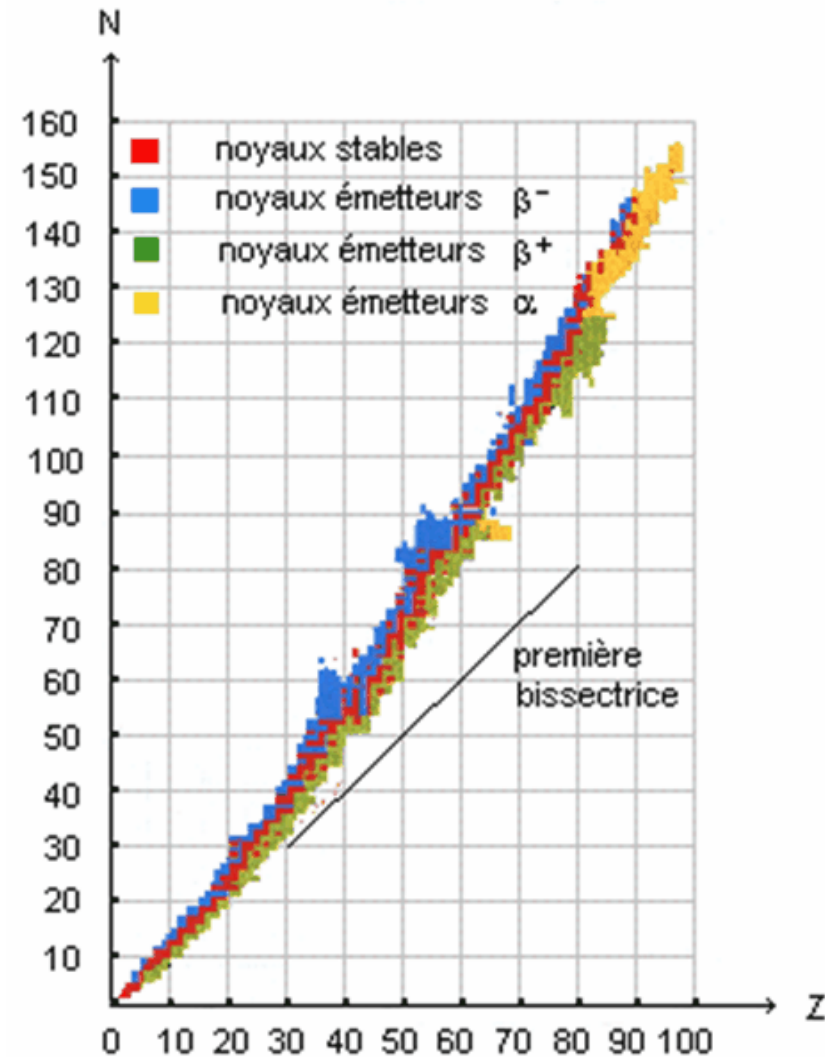


Lithium
3 protons

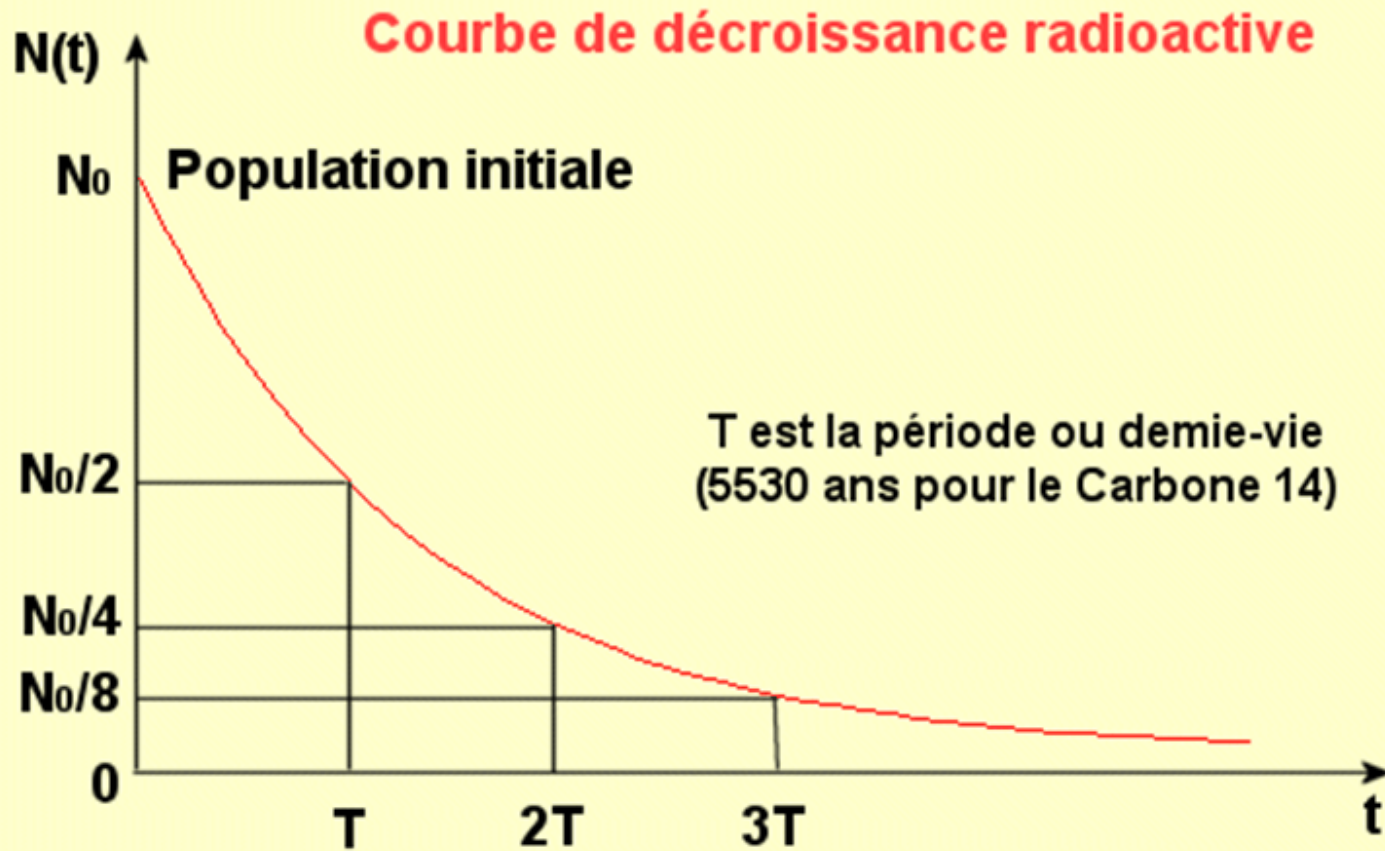


Stabilité des isotopes

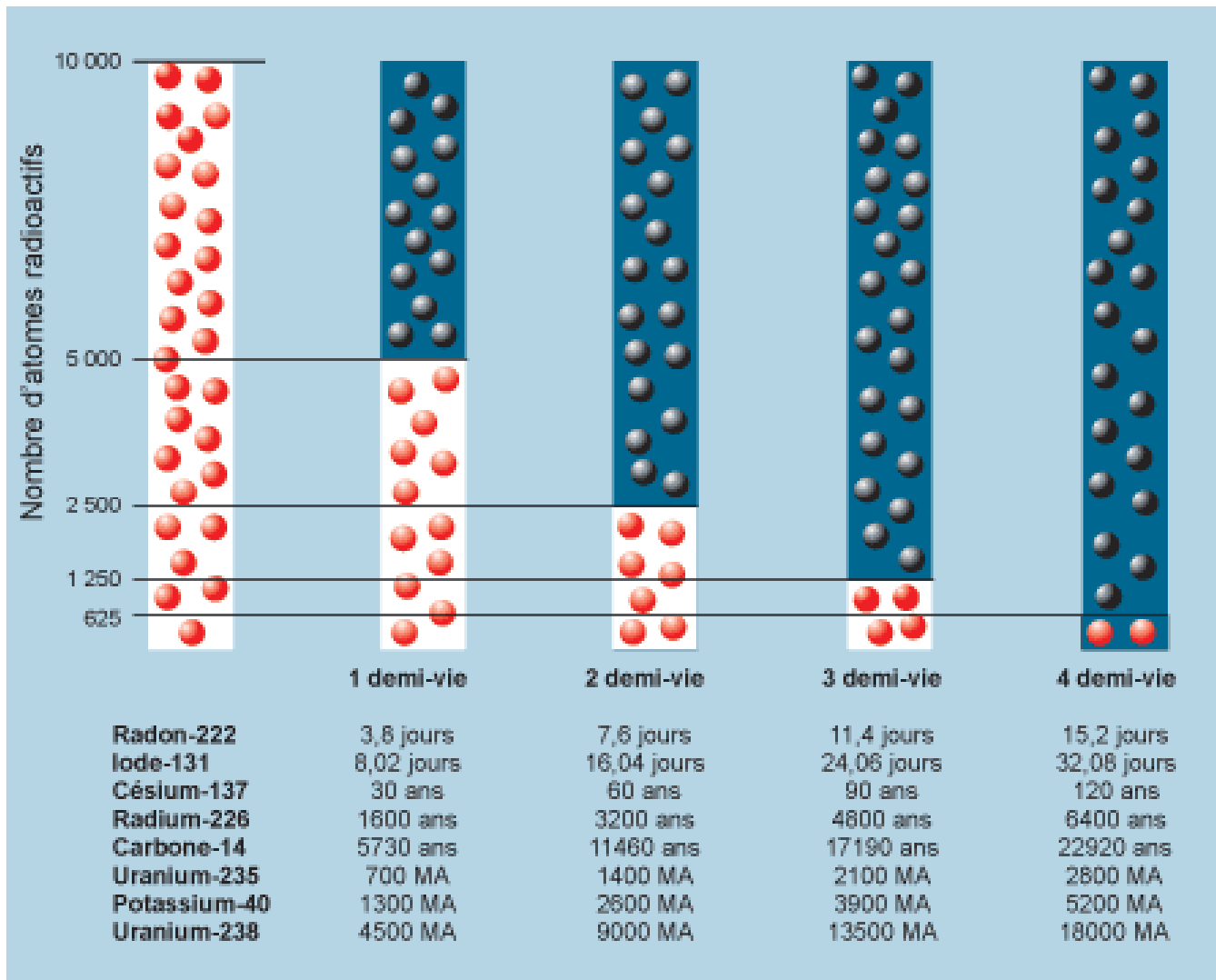
1. Le nombre de neutrons augmente plus vite que le nombre de proton. Dans un diagramme (N,Z), les éléments sont donc situés au-dessus de la première bissectrice.
2. Les neutrons jouent le rôle de « ciment » entre les protons qui ont tendances à se repousser par répulsion coulombienne. Cependant, ce « 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.



Demi-vie des isotopes



Demi-vie d'un isotope



Le Becquerel

Exemples d'activités (valeurs moyennes)

Substances radioactives naturelles dans:

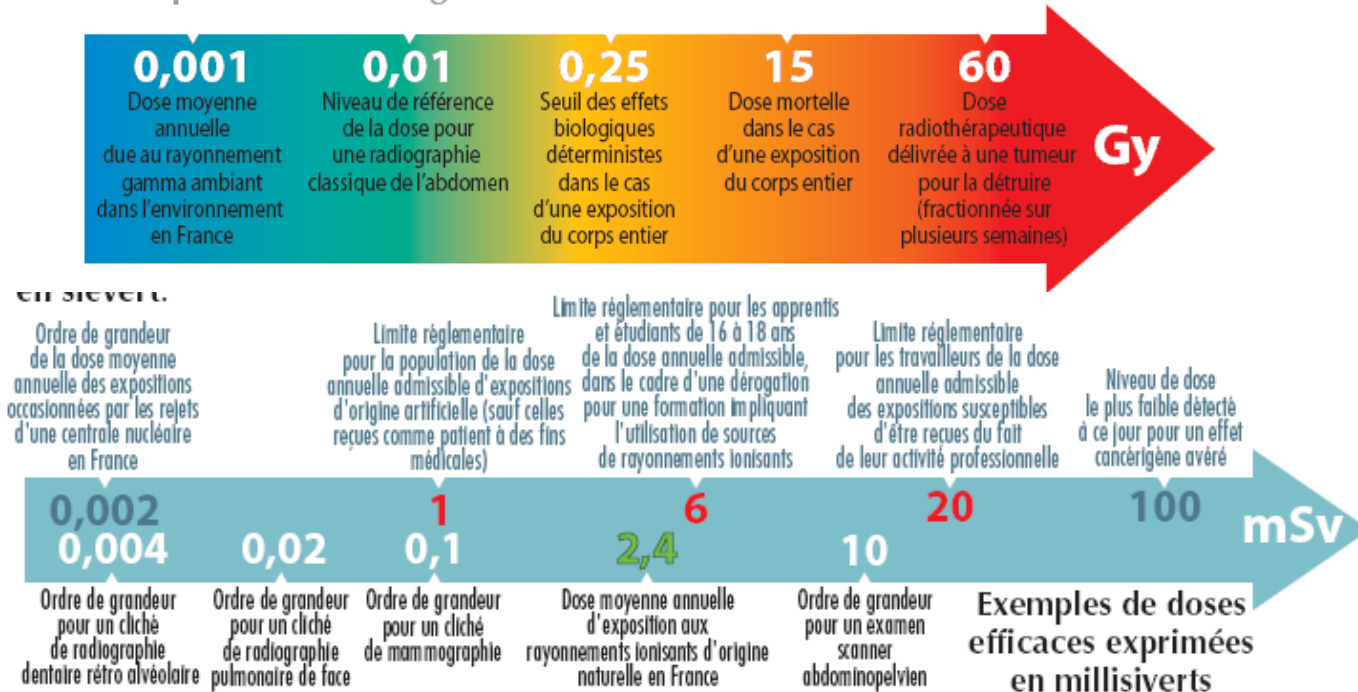
1 kg	Corps humain	130 Bq
1 m ³	Air de la campagne en Suisse	10 Bq
1 m ³	Air des lieux d'habitation en Suisse	60 Bq
1 m ³	Air des galeries de thérapie au radon de Gastein (Autriche)	43 000 Bq
1 kg	Granite du col du Grimsel	3 500 Bq
1 kg	Houille (Saxe)	10 000 Bq
1	Cristal de quartz	1 Bq
1 l	Eau de lacs 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	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



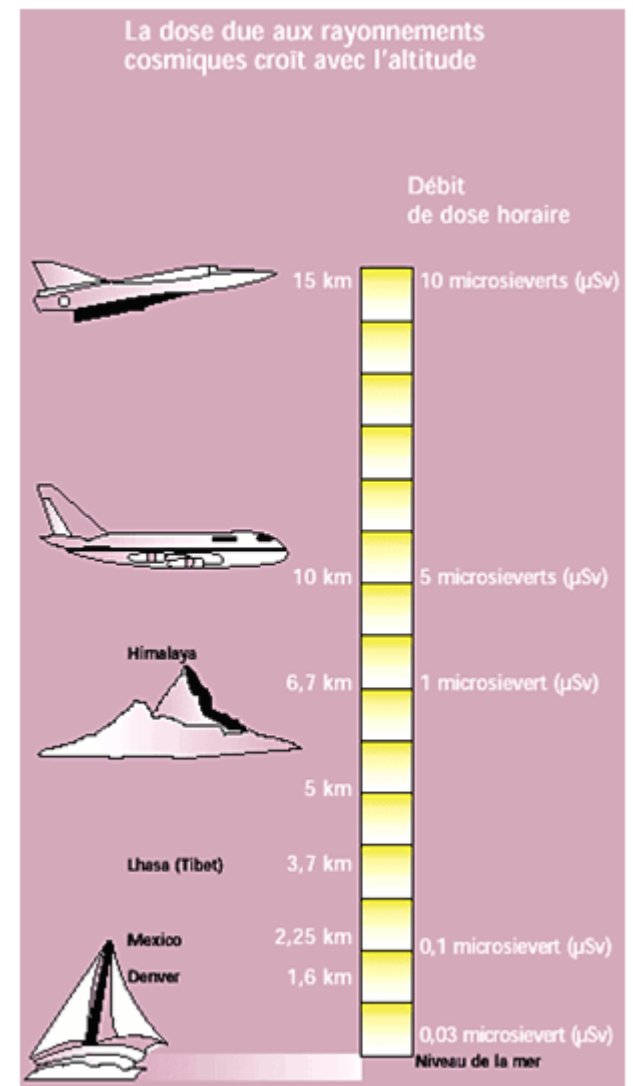
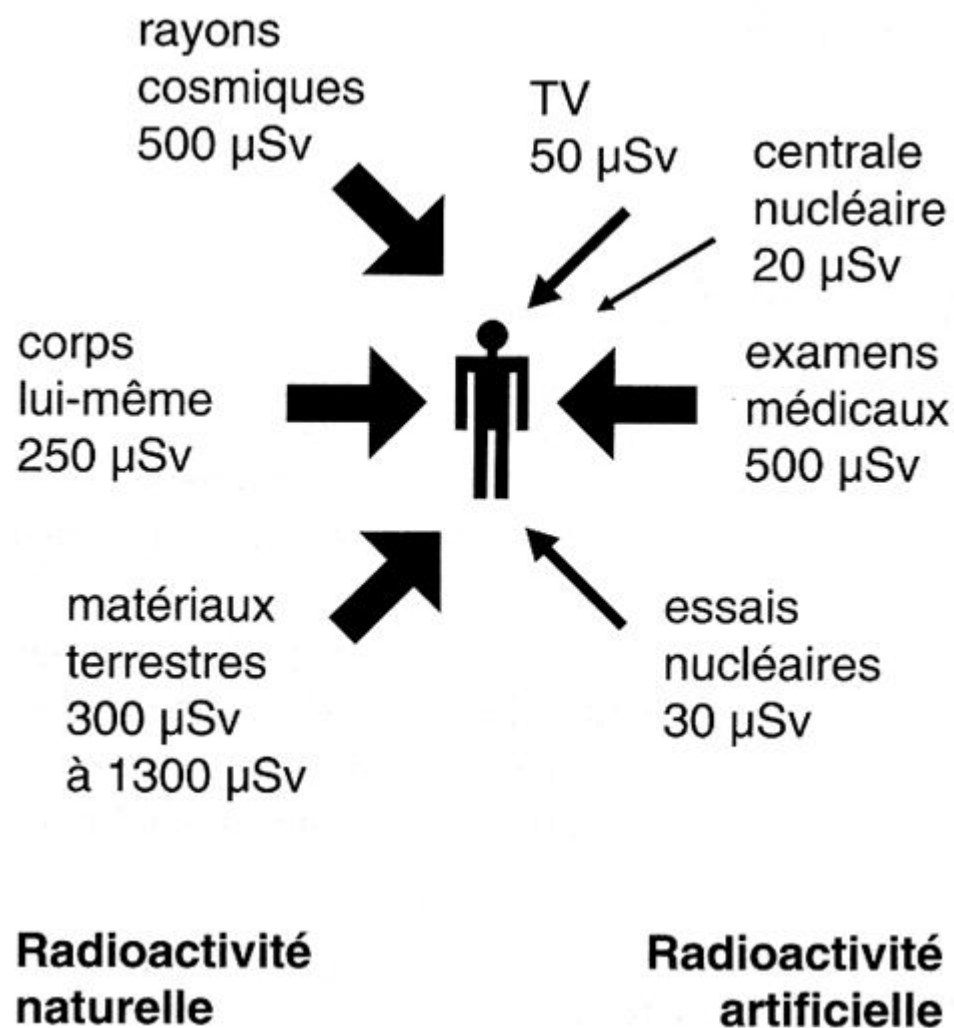
Dose biologiquement équivalente (DBE)

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 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



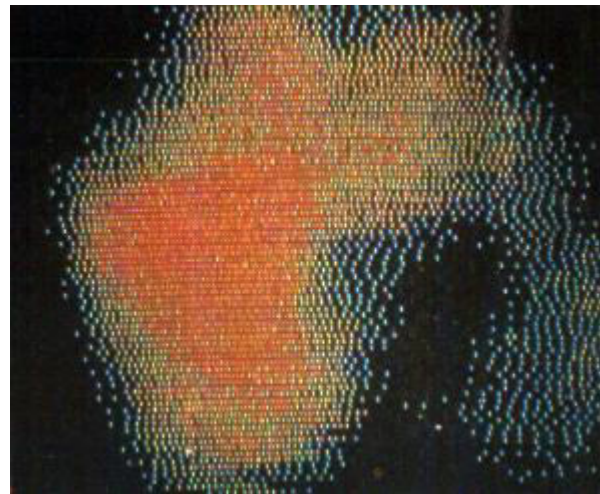
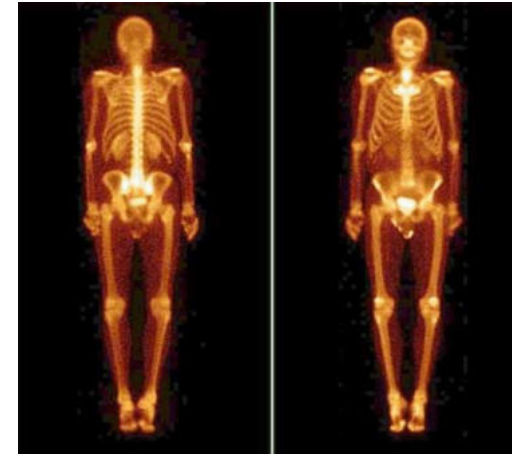
Applications de la radioactivité

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



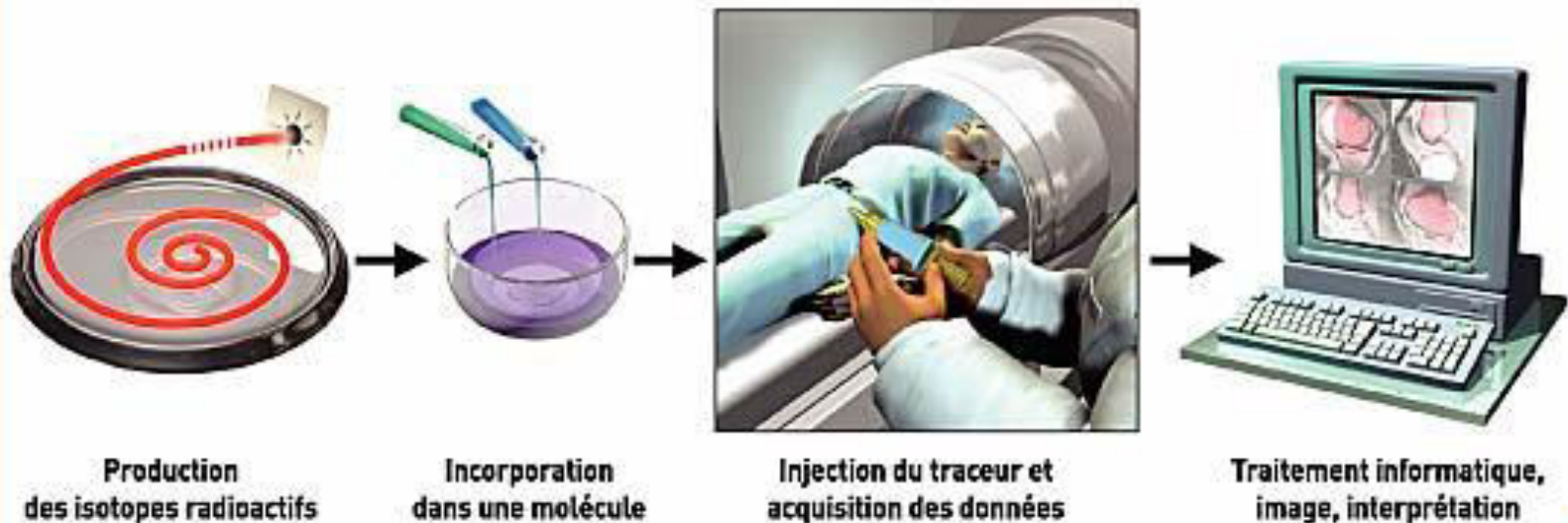
La scintigraphie



Scintigraphie du
foie

Applications de la radioactivité

Processus de l'imagerie par TEP



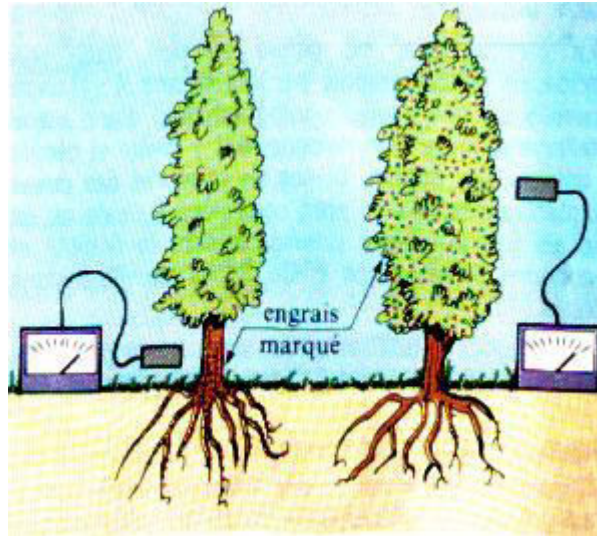
la tomographie par émission de positons (TEP)

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 β^+) 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 industrielle.
Opération de contrôle de
soudure afin de détecter un
éventuel défaut



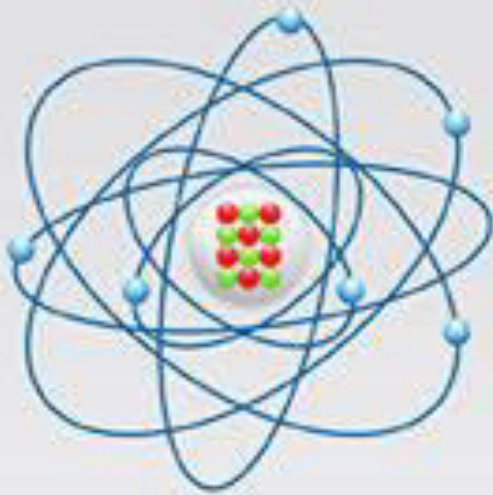
Gammagraphie de la statue d'Aphrodite

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.

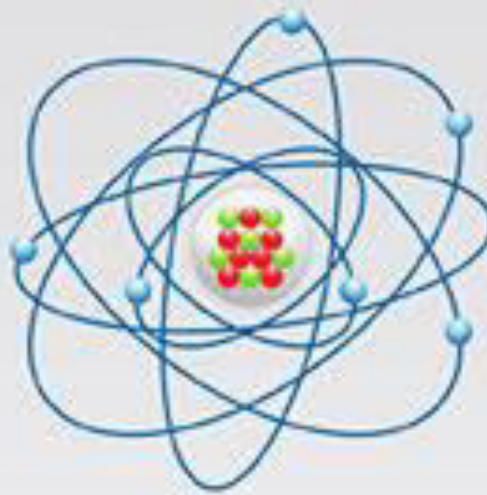


7. Conservation d'objets d'art.
*Consolidés par polymérisation sous irradiation, ces objets
deviennent imputrescibles.*

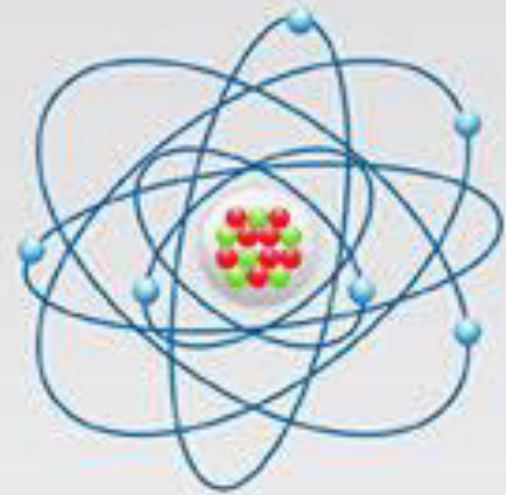
Datation au carbone 14



Carbon-12
stable



Carbon-13
stable

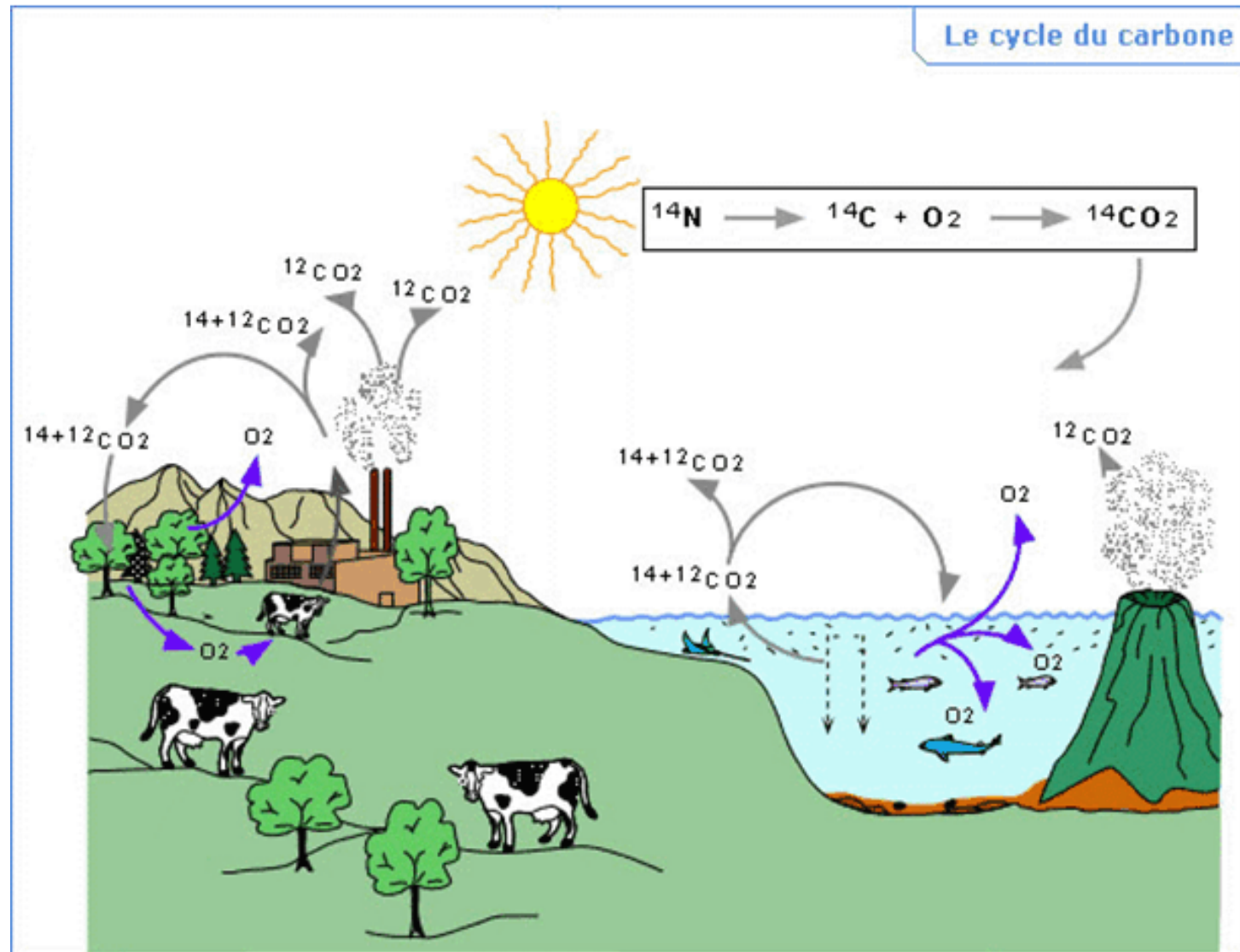


Carbon-14
unstable (radioactive)

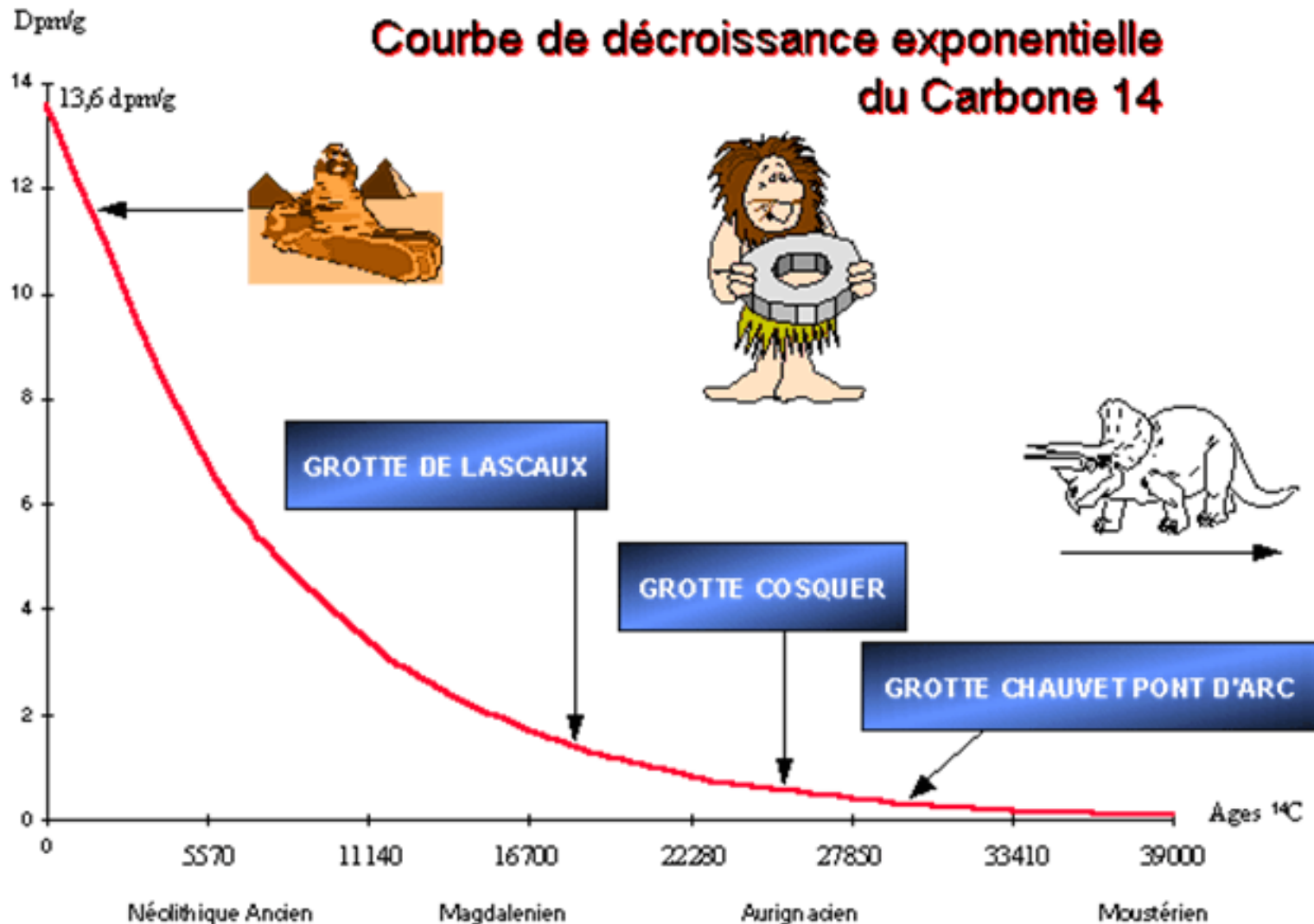
Key:  Proton
 Neutron
 Electron

Les isotopes du carbone

Datation au carbone 14



Datation au carbone 14



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 ($= 6.10^{23}$ atomes) d'atomes de C a une masse de 12 g

Donc $1 \text{ uma} = 12.10^{-3} / 6,02.10^{23} = 1,6606.10^{-27} \text{ kg}$

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	masse mesurée de ${}^4_2\text{He}$
$2m_p = 2.1,0073 = 2,0146 \text{ uma}$	
$2m_n = 2.1,0087 = 2,0174 \text{ uma}$	
$2m_e = 2.0,0005 = 0,0010 \text{ uma}$	
total	$4,0330 \text{ uma}$ $4,0026 \text{ uma}$

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

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

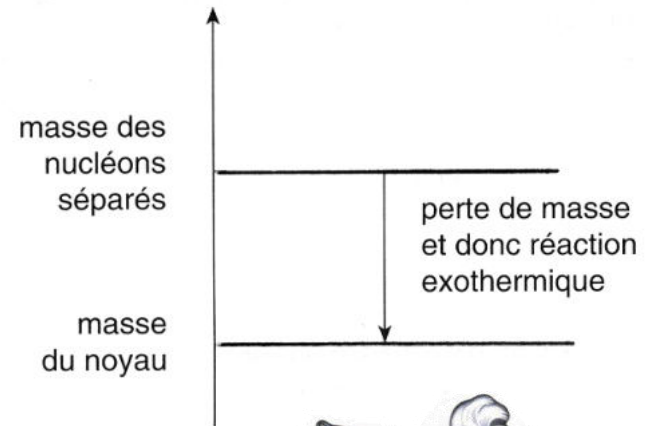
E	Energie en J
M	Masse en kg
c	Vitesse de la lumière = $3.10^8 m/s$

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 :
 $4,54 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 10^{23} = 2,73 \cdot 10^{12} \text{ J}$

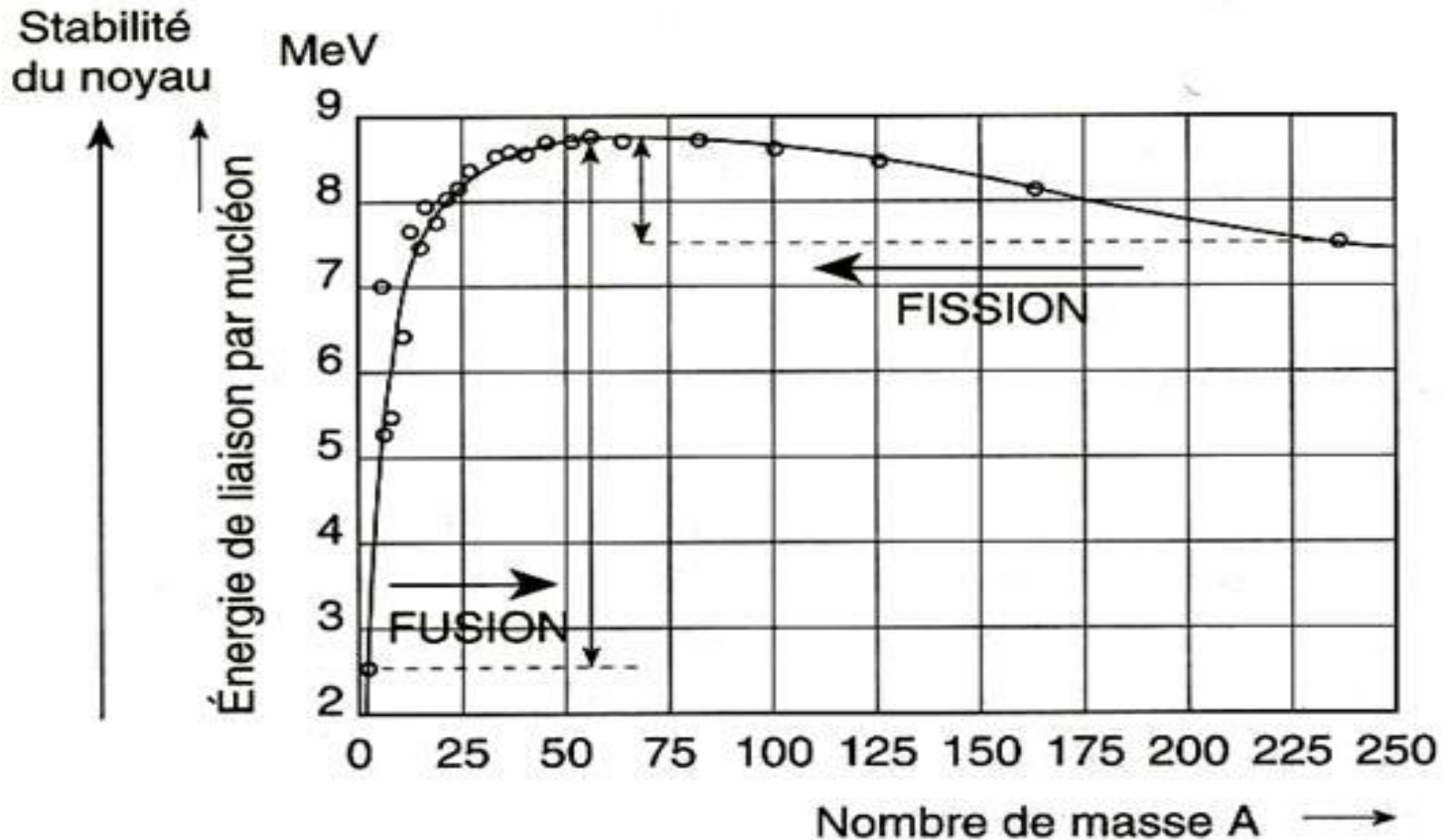
Cette énergie est **considérable** en rapport des énergies rencontrées en physique ou en chimie

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	$2,73 \cdot 10^9 \text{ kJ/mole}$	28,3 MeV/noyau

Energie de liaison par nucléon

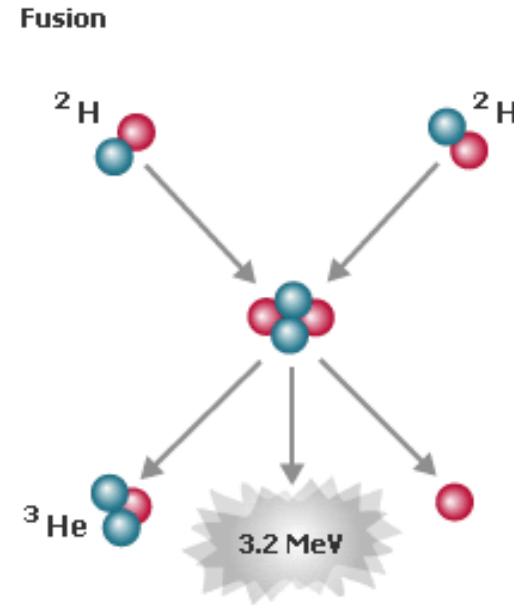
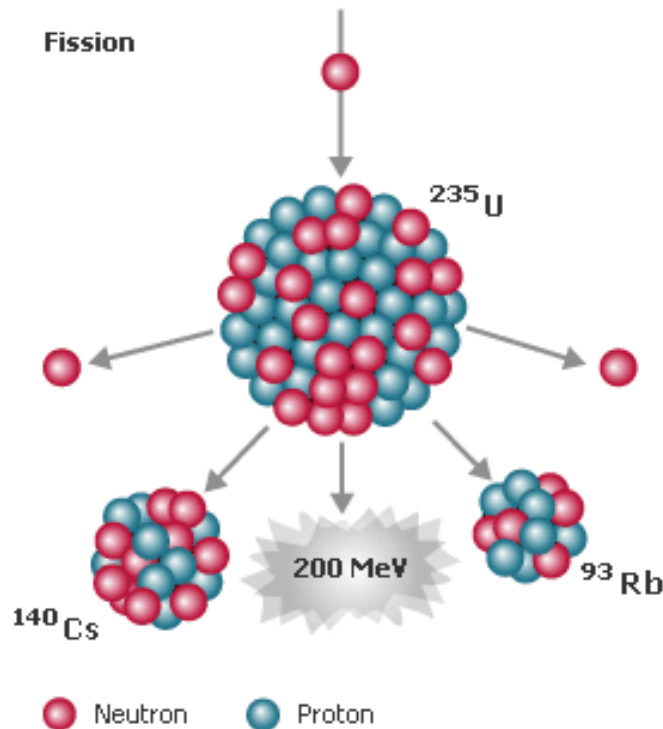
$$E_{L_{\text{nucléon}}} = \frac{E_L}{A}$$

$E_{L_{\text{nucléon}}}$	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.

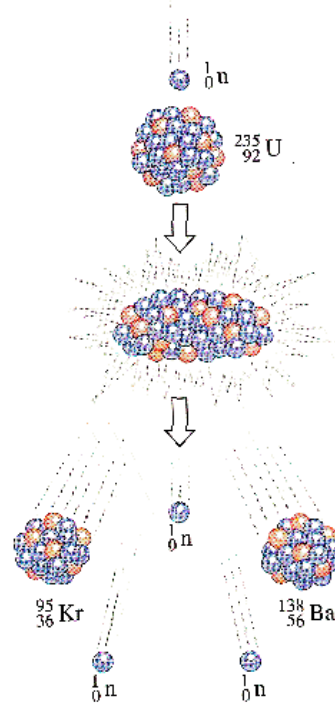


Figure 32.16 Fission de l'U-235.

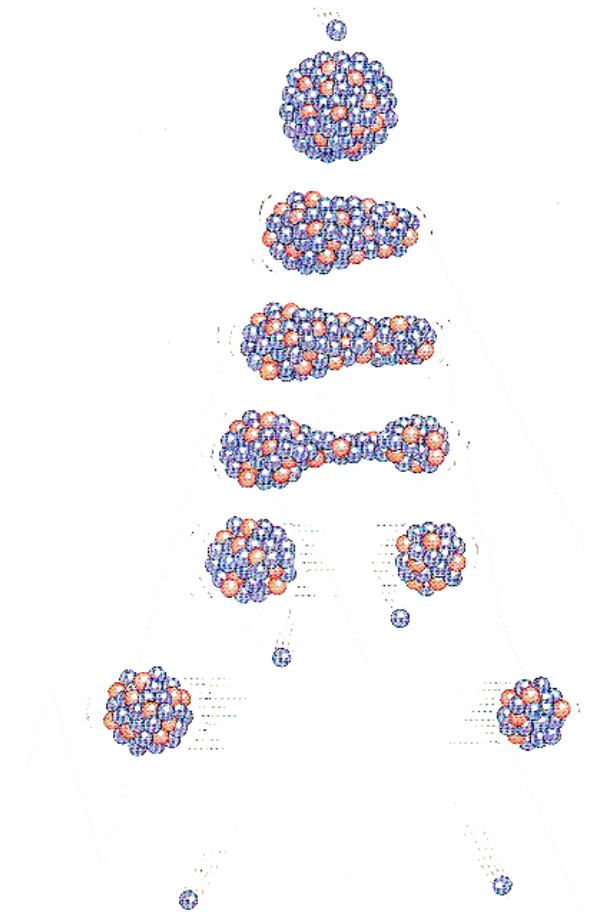
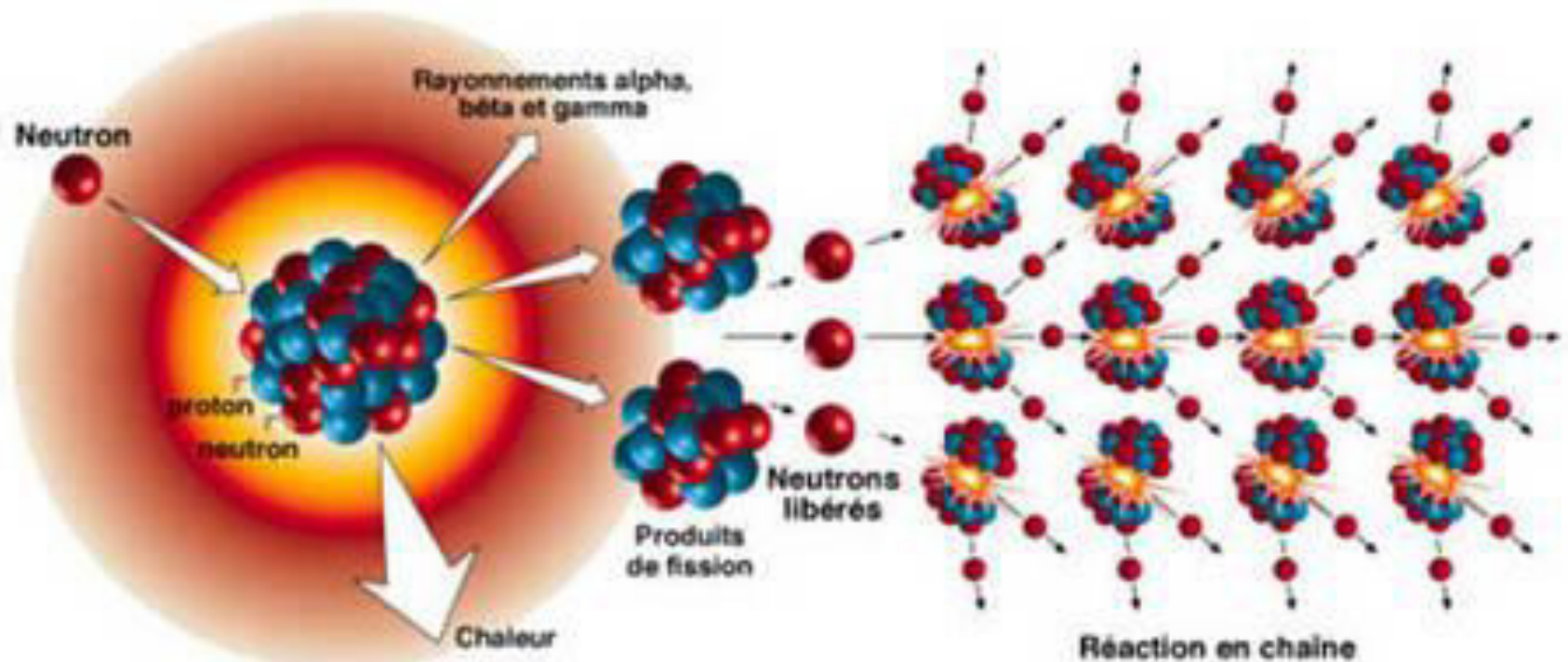


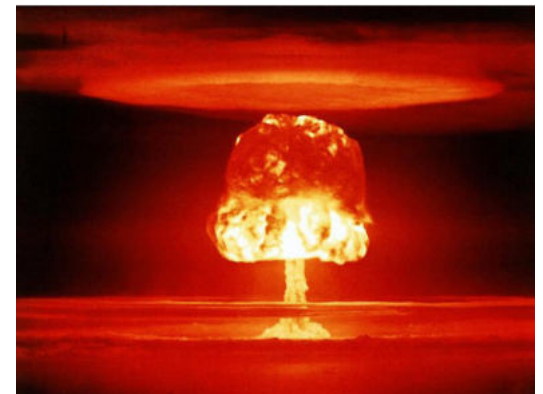
Figure 32.17 Fission nucléaire.

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**.

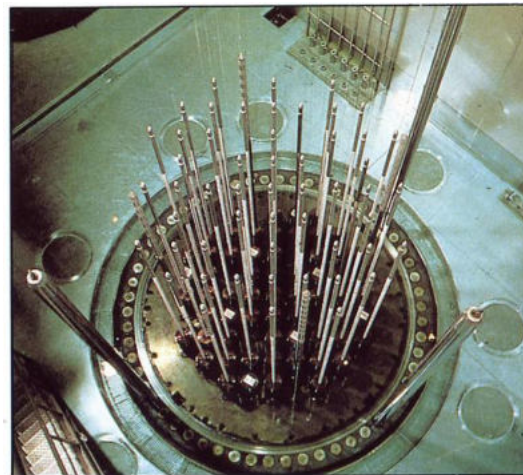
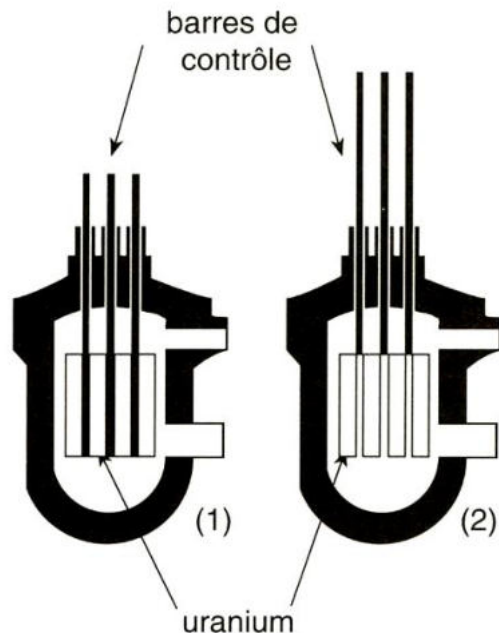
En très peu de temps, une très grande quantité d'énergie sera libérée: la réaction est explosive. **C'est le principe de la bombe nucléaire appelée (à tort) bombe atomique (bombe A).**



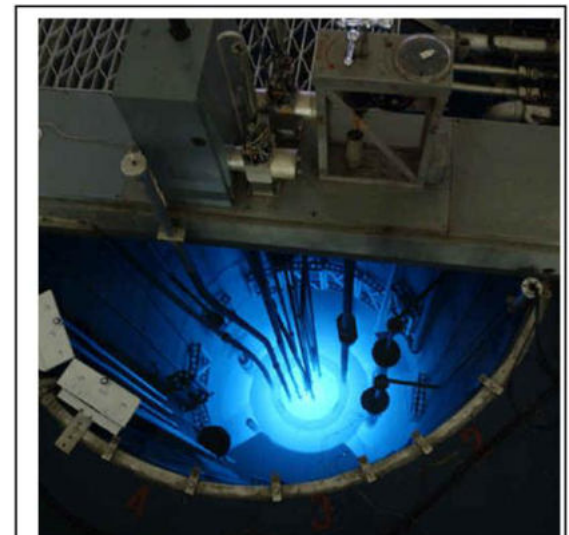
Réacteur nucléaire

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) :

Fonctionnement d'une centrale

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

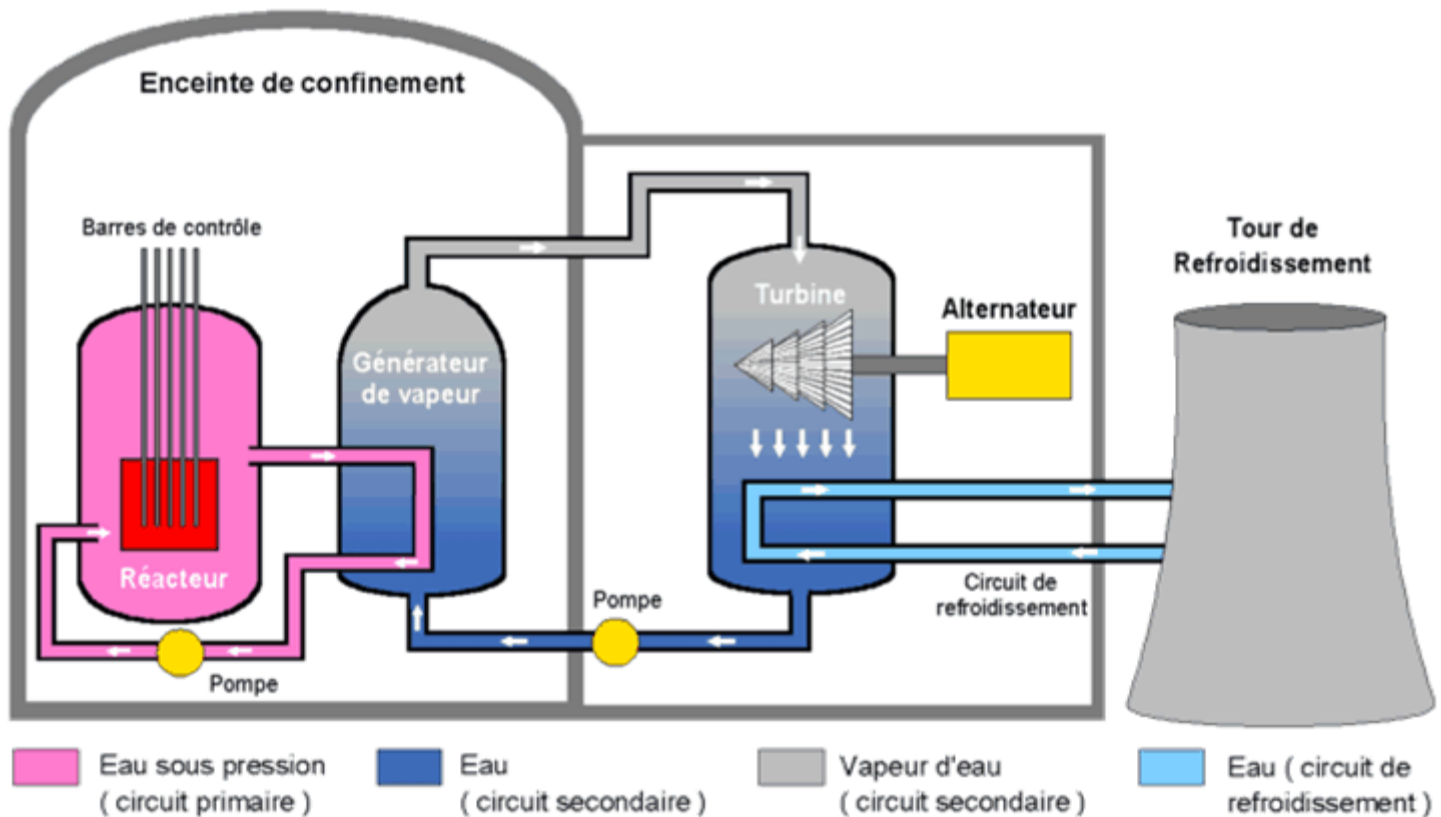
Un neutron **lent** (d'énergie cinétique équivalente à celle d'une molécule d'air à température normale, environ 0,04 eV) a plus de probabilité de déclencher une fission qu'un neutron rapide. Or les neutrons produits par les fissions sont rapides. ***Il faut donc les ralentir, ce qui se fait grâce aux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

La plupart des réacteurs dans le monde sont des réacteurs refroidis à eau sous pression (**PWR**: pressurized water reactor); c'est le cas de tous les réacteurs belges à Tihange et Doel. Le cœur d'un réacteur PWR est une cuve cylindrique verticale en acier, contenant:

- des tubes en acier contenant le « combustible » : de l'uranium enrichi à 3% d'U235
- les **barres de contrôle** qu'on peut abaisser ou soulever
- le **modérateur** : de l'eau
- le **fluide caloporteur** fluide qui va « extraire » la chaleur produite par les réactions de fission: c'est de l'eau pressurisée pour l'empêcher de bouillir (environ 300°C; 155 bar). Cette eau dans laquelle plongent les tubes de combustible est à la fois le fluide caloporteur et le modérateur.



Schéma de principe d'une centrale



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

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

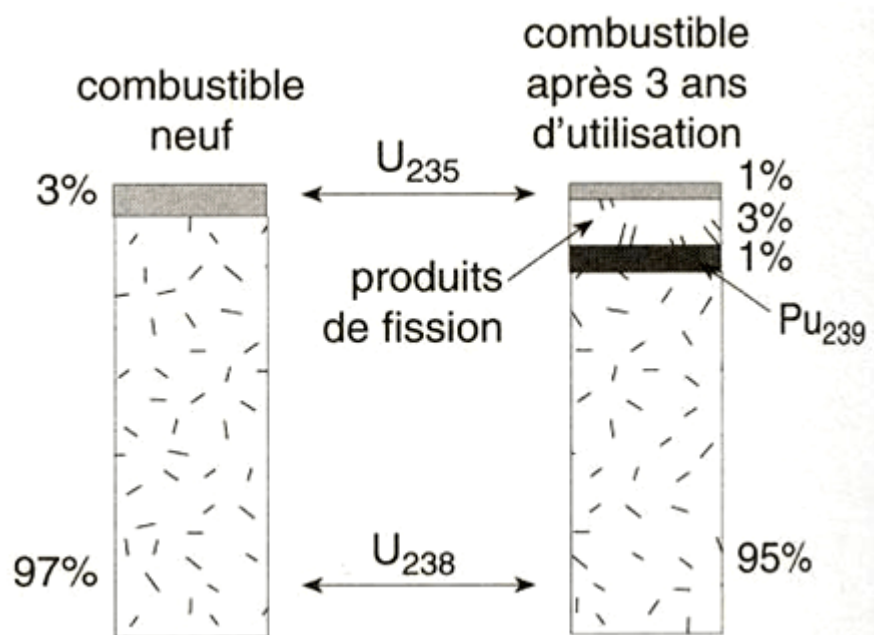
Source : Power Reactor Information System, www.iaea.org

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.

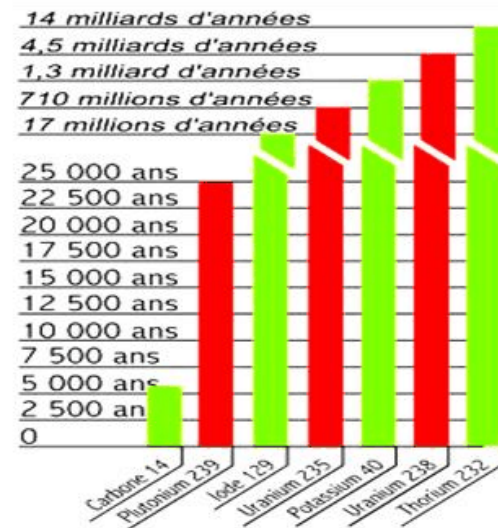
En janvier 2003, la Belgique a voté une loi stipulant que les sept unités devraient être fermées après 40 ans d'opération. Le premier réacteur devrait donc être arrêté en 2015 et le dernier en 2025.

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.

Les déchets nucléaires



Les déchets nucléaires perdent la moitié de leur radioactivité en :



Période ou demi-vie du césium 137 : 33 ans

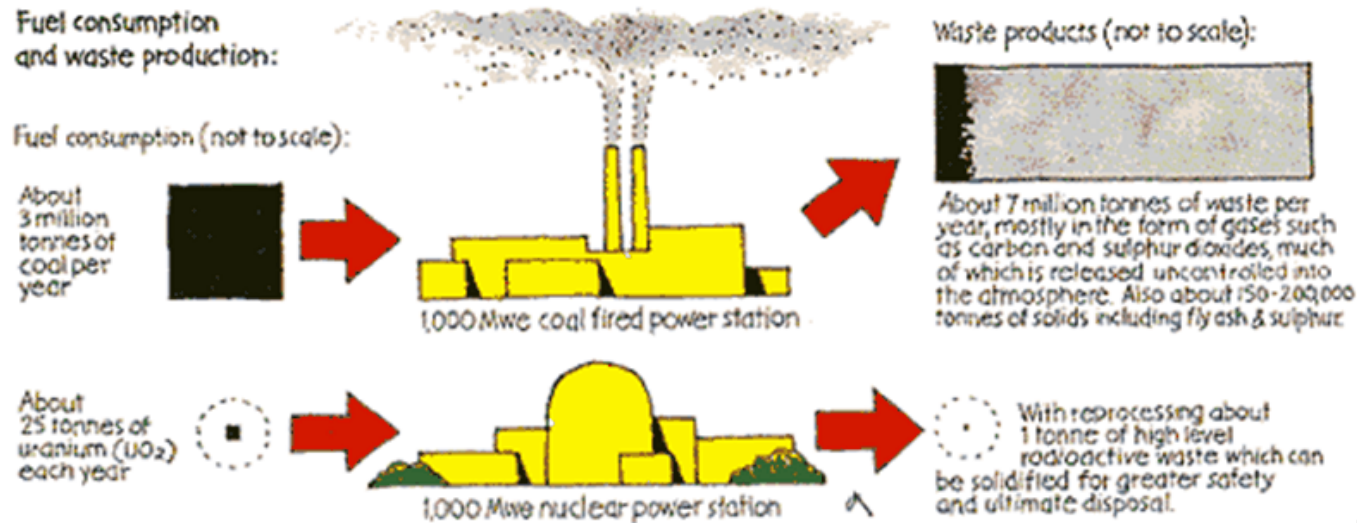
Période ou demi-vie du plutonium 239 : 24 360 ans

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 (Bq/g)
Période	Activité	Volume (%)	Rayonnement (%)	
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

Centrale à charbon et centrale nucléaire



Unité au charbon

- 3.1 millions de tons de charbon
- 7 millions de tons de CO_2
- 200 000 tons de SO_2 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_2 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 CO₂
3. 1.2 millions de tons de SO₂
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 CO₂ 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 m³ d'uranium enrichi représentent 3 ans de fonctionnement d'une centrale de 1000 MW; tandis que 500 000 m³ de charbon n'en représente que 3 mois!
5. Pas de production de CO₂

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.



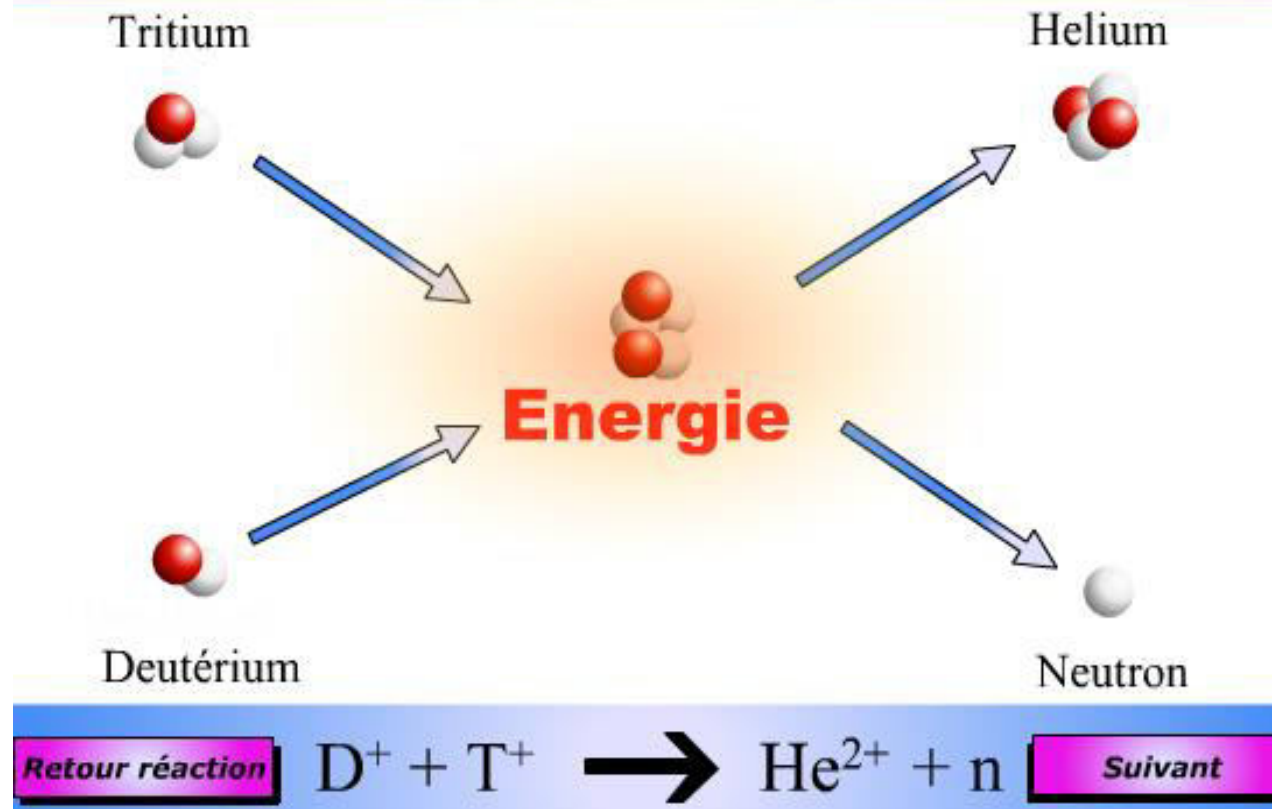
La fusion



La nature utilise
abondamment la
fusion nucléaire
dans les étoiles.

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

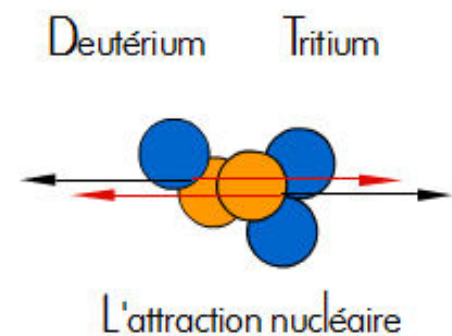
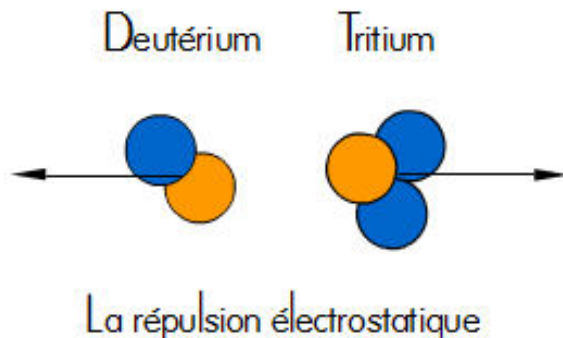
Principe de la réaction de fusion



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.

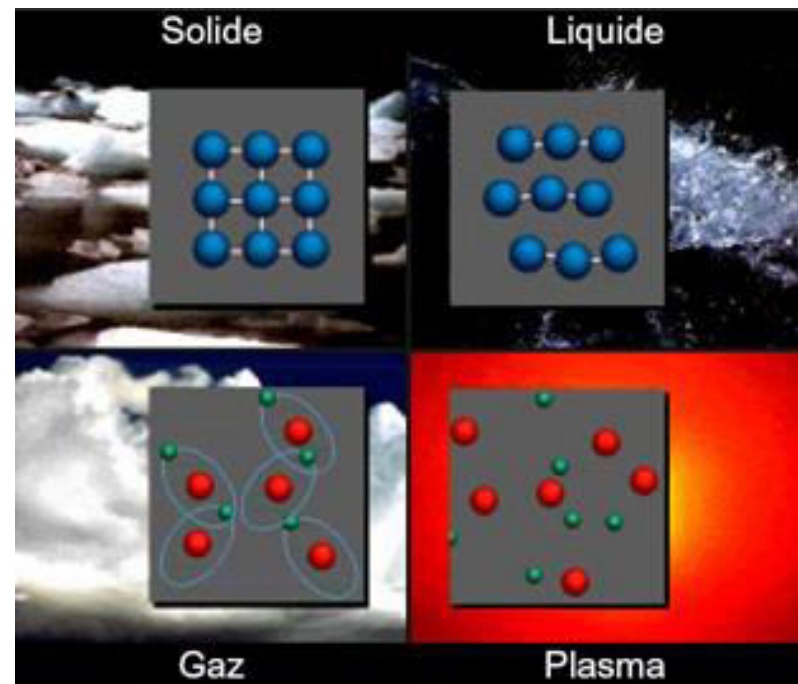
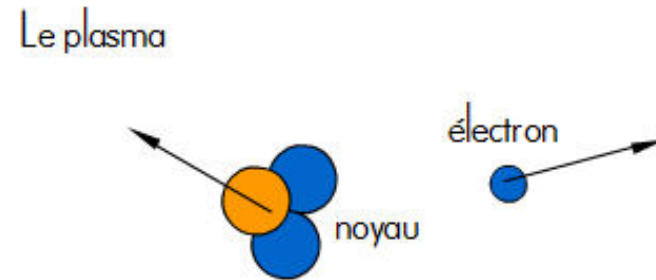
Sur le chemin de l'énergie de fusion

- 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.



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.



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

Nuages sombres moléculaires



Proto-étoiles



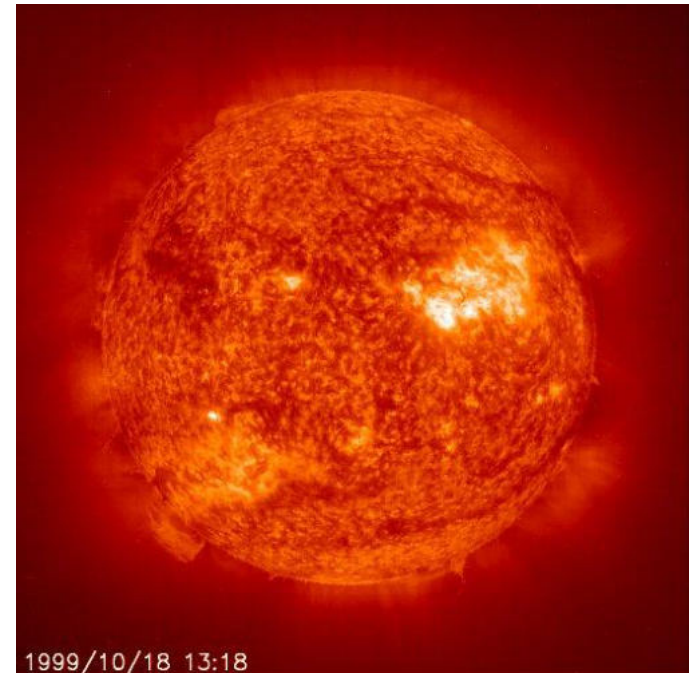
Nouvelle étoile

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.



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.

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.

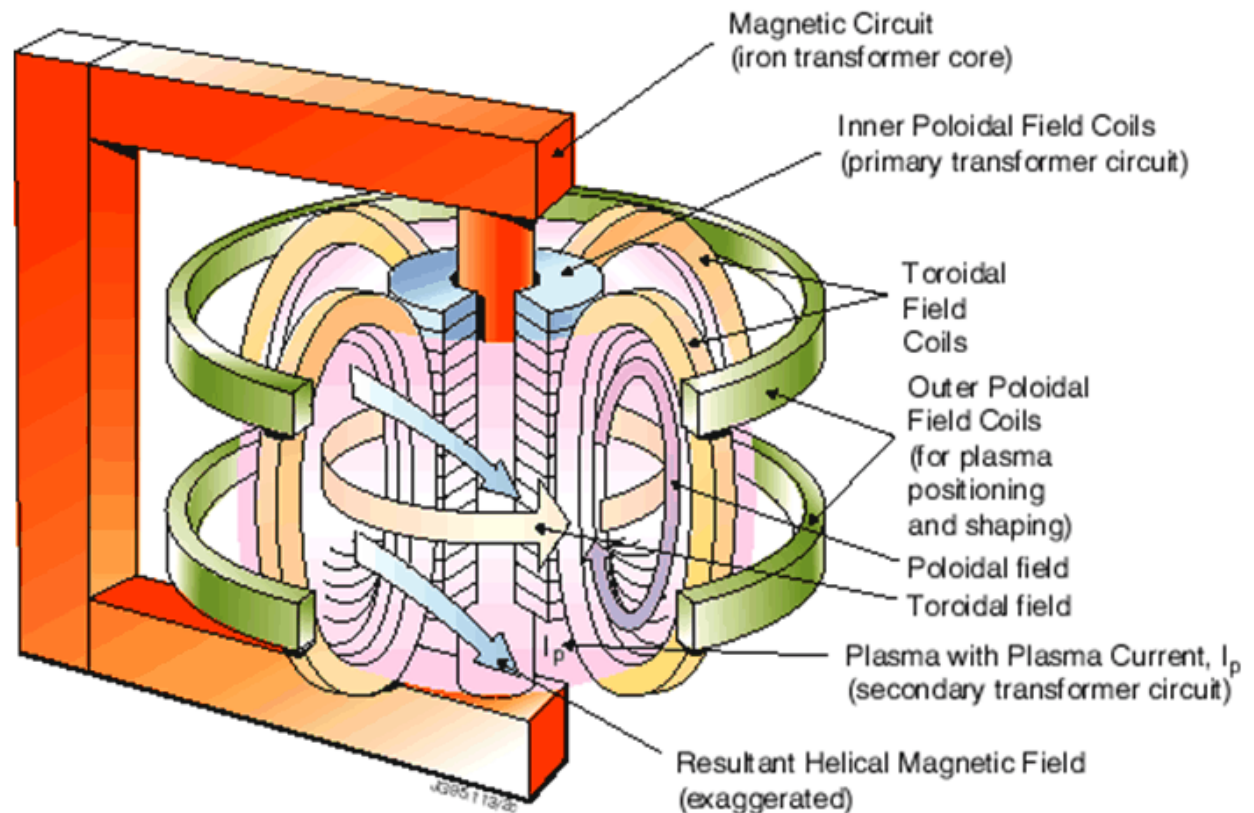
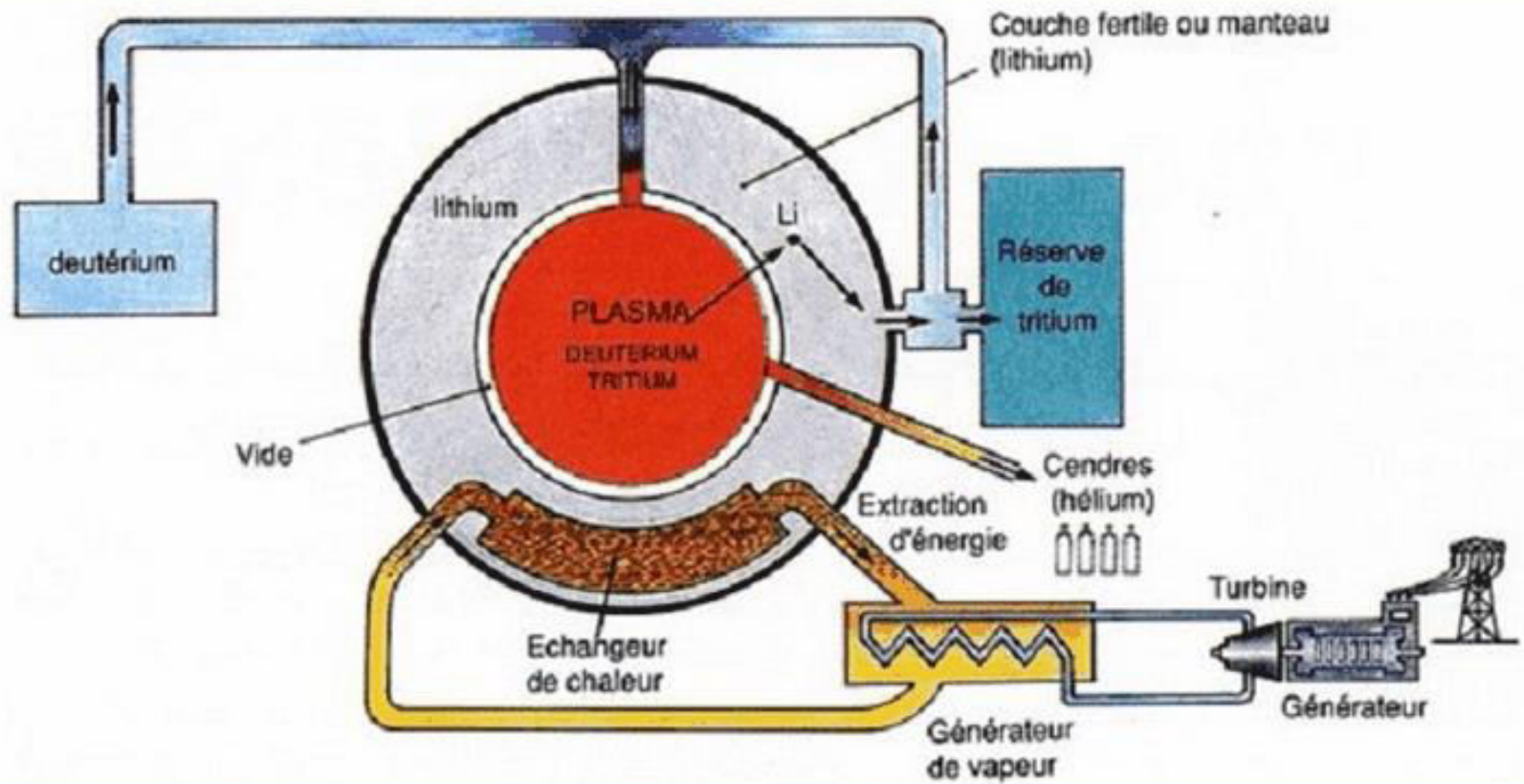


SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN RÉACTEUR DE FUSION



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_{fus} 500MW

Durée 500s

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

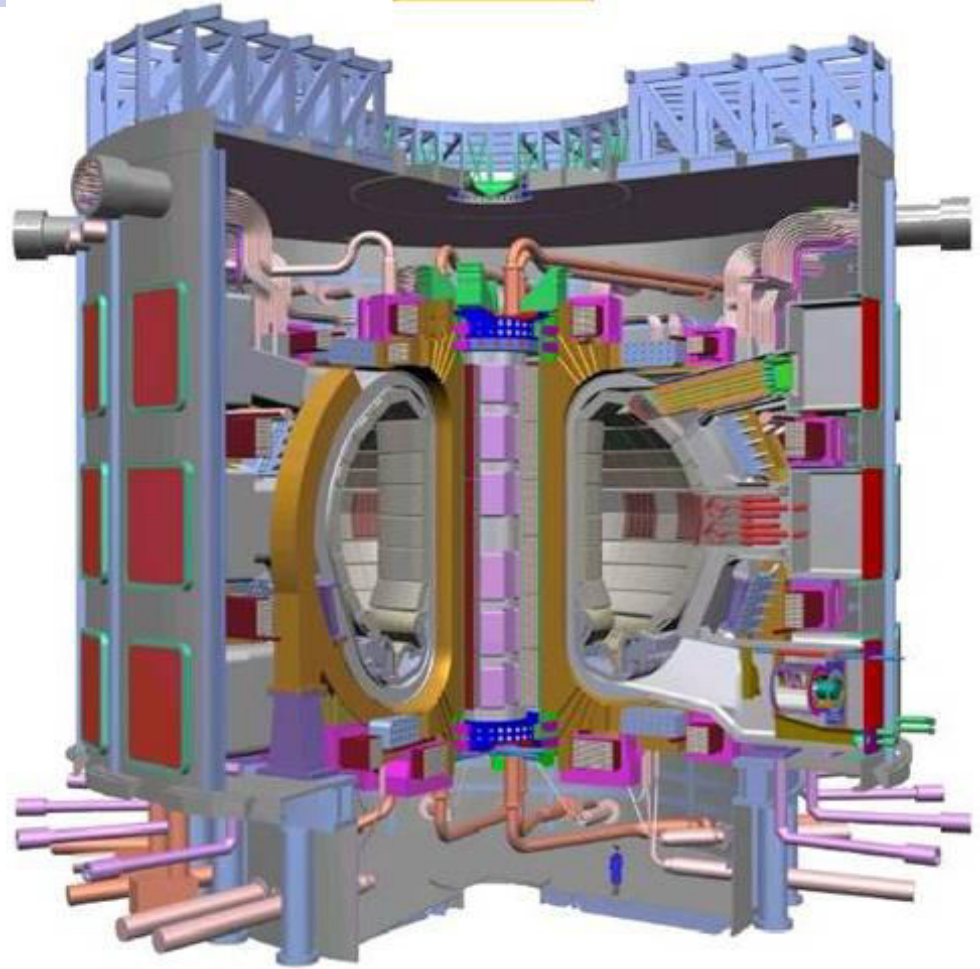
Paramètres

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 $\Rightarrow$ 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!

