

# Physique nucléaire

Les **prérequis** pour la compréhension de ce chapitre sont :

- Travail, puissance, énergie mécanique, énergie thermique.
- Structure de la matière, température et agitation thermique.
- Transformations, conservation et dégradation de l'énergie.
- Transport de l'énergie électrique.

Au terme de ce chapitre :

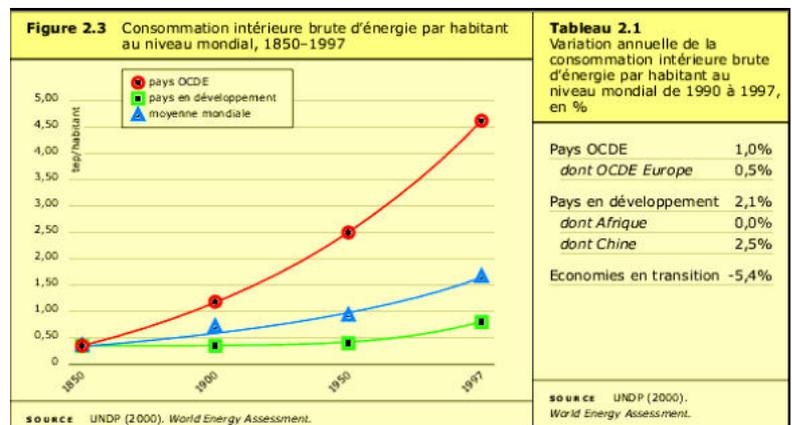
- vous devez **Savoir**
  - *Radioactivité*
    - Découverte de la radioactivité.
    - Rayonnements  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  ; propriétés.
    - Isotopes, nuclides stables, nuclides instables.
    - Désintégration, demi-vie.
    - Fission de l'uranium 235, fusion nucléaire, défaut de masse et libération d'énergie, réaction en chaîne, applications.
    - Utilisation des radio-isotopes :
      - traceurs radioactifs utilisés en médecine, dans l'agriculture, dans l'industrie ;
      - radiothérapie.
  - *Production d'énergie électrique*
    - Centrales thermiques classiques et nucléaires.
    - Problèmes environnementaux, rejets et déchets.
    - Épuisement des ressources et énergies renouvelables.
- Vous devez avoir acquis les **compétences**, vous permettant d'expliquer ou de comprendre les points suivants :
  - Qu'est-ce que la radioactivité ? Qu'est-ce qu'un rayonnement ?
  - Est-elle dangereuse ? Quelles sont les différences du point de vue de leur nature, de leur origine, de leur pouvoir de pénétration, et de leurs effets sur le corps humain des émissions  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  ?
  - Qu'est-ce que l'uranium enrichi ? Appauvri ?
  - Comment une éolienne fonctionne-t-elle ? Et une centrale nucléaire ?
  - Quelle est la différence entre la fusion et la fission nucléaire ?
  - Expliquer la relation  $E = mc^2$ .
  - Décrire le principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire.
  - Comparer les rejets et déchets d'une centrale thermique à combustible fossile à ceux d'une centrale nucléaire.

## 1 Introduction

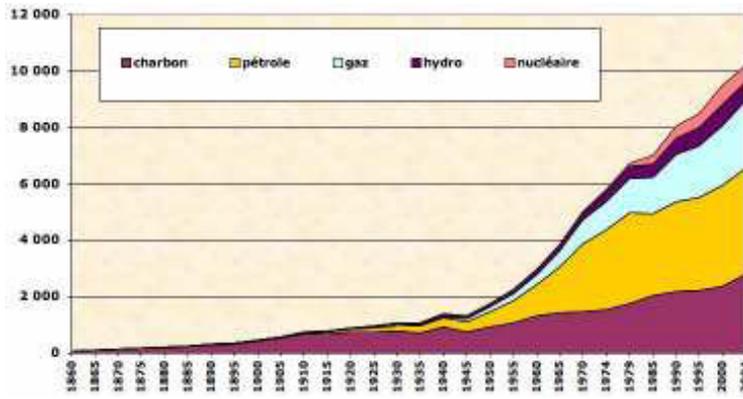
### 1.1 LE PROBLEME DE L'ENERGIE

L'énergie est un des problèmes majeurs avec lequel l'humanité sera confrontée dans les toutes prochaines décennies. De nombreuses et lourdes décisions doivent être prises pour d'une part assurer la fourniture de l'énergie nécessaire au développement de nos sociétés tout en préservant la nature et en luttant efficacement contre le réchauffement climatique.

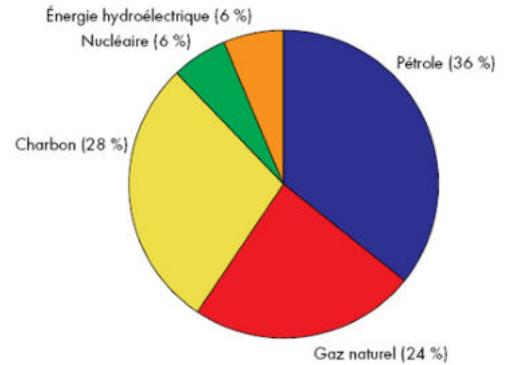
Voici en quelques graphiques la position du problème :



### Evolution de l'utilisation des principales sources d'énergie

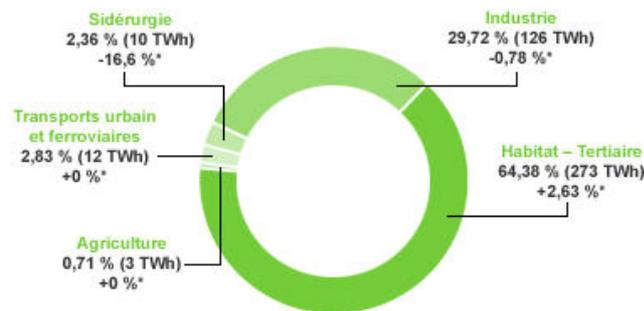


### Consommation mondiale d'énergie primaire selon le combustible, 2006



Source : BP Statistical Review of World Energy, 2007

### Répartition de la consommation en 2004 pour la France



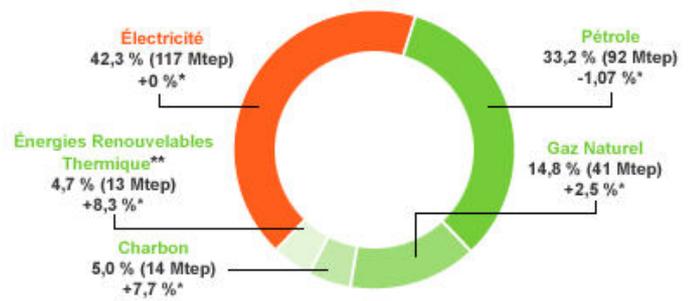
\* Par rapport à 2004

(Observatoire de l'Énergie  
Rapport Repères sur l'énergie en France - édition 2006)

Le résidentiel et le tertiaire consomment la majeure partie de cette électricité et ce, avec une progression constante.

Ces données établies pour la France peuvent être extrapolées à la Belgique.

### Part de l'électricité dans la consommation totale d'énergie en France



\* Par rapport à 2004

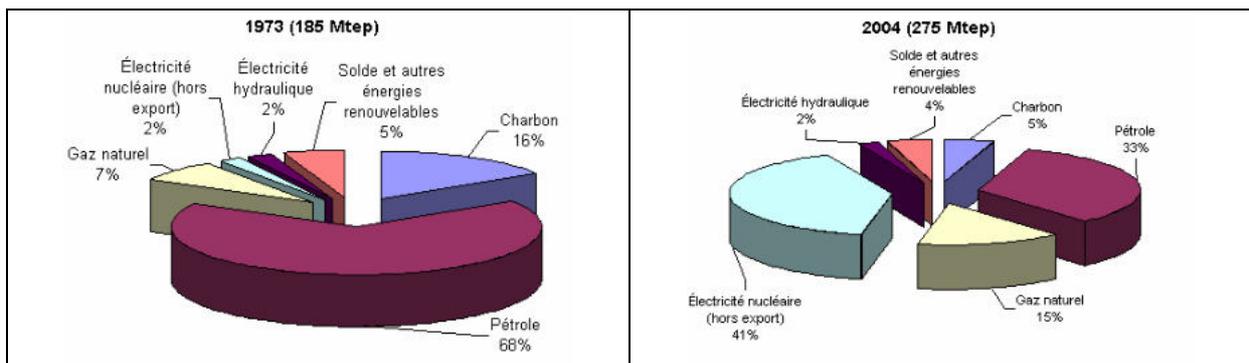
\*\* Utilisées pour la production de chaleur (bois, déchets urbains renouvelables, géothermie thermique, solaire thermique, biogaz).

(Observatoire de l'Énergie  
Rapport Repères sur l'énergie en France - édition 2006)

La consommation d'énergie en 2005 en France est de 276 Mtep.

L'électricité représente presque la moitié de la consommation d'énergie et ce, avec une progression constante (et plus généralement sur les 30 dernières années), du fait du développement de l'énergie nucléaire

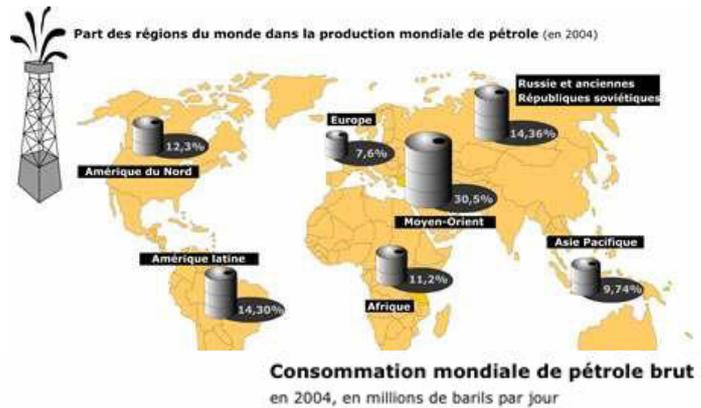
### Le mix-énergétique de la France en 1973 et 2004



En progression constante, la consommation d'électricité, est essentiellement utilisée par les habitations et le secteur tertiaire.

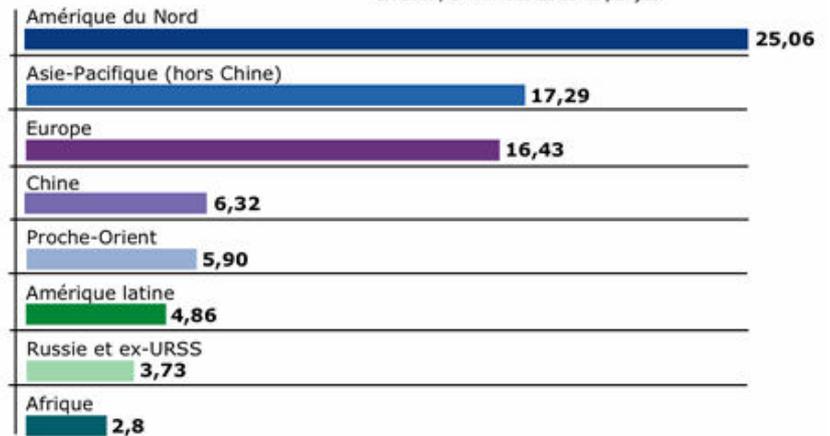
### La production de pétrole

Pour illustrer le fait que les découvertes "majeures" sont maintenant fortes anciennes, on peut souligner que l'essentiel de la production de pétrole du Moyen Orient - qui totalise 2/3 des réserves mondiales et un tiers de la production mondiale - provient de champs découverts il y a fort longtemps (plus de 50 ans).



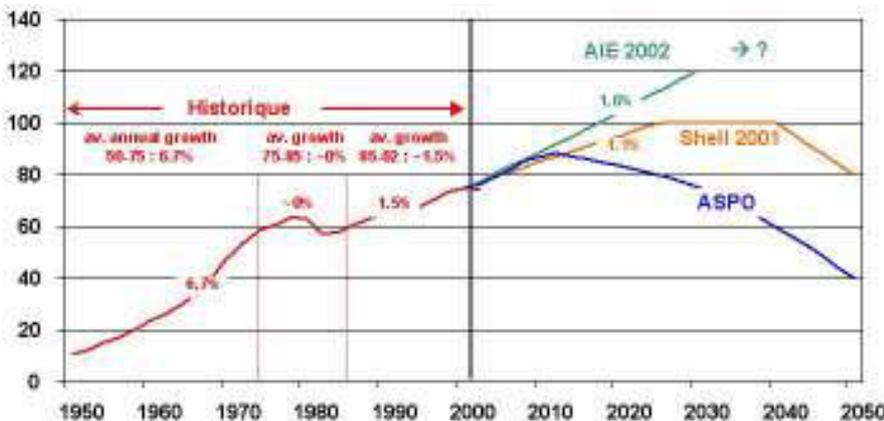
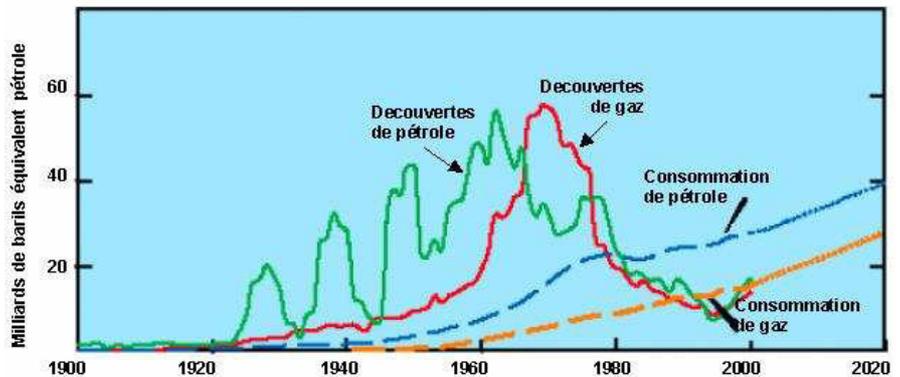
### La consommation de pétrole et de gaz

Note : 1/4 de la population mondiale consomme les 3/4 des ressources (A méditer)



### Prévision de l'évolution de la production de pétrole et de gaz

En vert, découvertes annuelles de pétrole récupérable, en milliards de barils, et en bleu, consommation annuelle de produits pétroliers (même unité). Depuis 1980 (d'autres auteurs considèrent que cela est même vrai depuis 1970), nous consommons chaque année plus que nous ne découvrons de ressources "physiques" dans le sol (il s'agit bien là du total des ressources physiques, encore appelées



### Production mondiale de pétrole en millions de barils par jour. La courbe indique la production réelle jusqu'en 2004, puis des extrapolations diverses selon les sources :

➤ La courbe ASPO représente la production maximale possible selon cette association. "ASPO" signifie

Association for the Study of Peak Oil, qui regroupe des géologues pétroliers à la retraite, des experts professionnellement actifs, et qui organise un séminaire annuel sur la question des réserves pétrolières restantes.

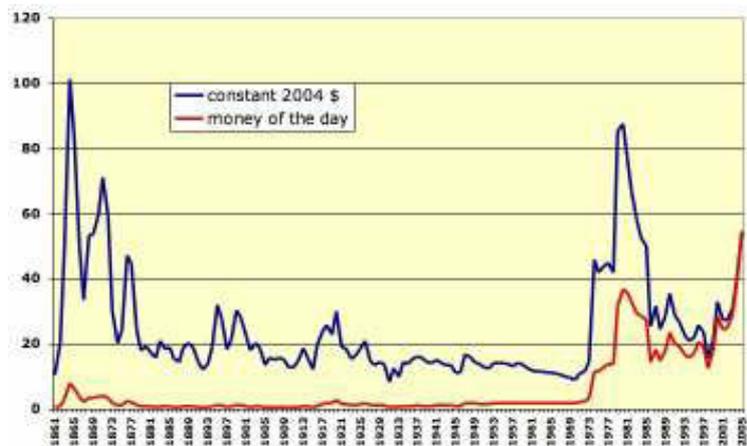
- "Shell" se réfère bien sûr à la compagnie du même nom ; il s'agit là aussi d'une courbe donnant la production maximale possible selon cette société, qui pense donc que le début du pic (en fait un plateau) devrait intervenir vers 2025 ; c'est à quelques années près la date publiquement indiquée par Total depuis 2004 (Total parle désormais de 2020, plus ou moins quelque chose) bien qu'elle ne figure pas (encore) sur ce graphique,
- "AIE" signifie "Agence Internationale de l'Energie", et la courbe verte illustre une **consommation** future obtenue en prolongeant la consommation passée, sans prise en compte des possibilités réelles de production. Le point d'interrogation - mis par Total - qui "commente" cette courbe signifie que le pétrole qui permettrait à la consommation de croître jusqu'à 120 millions de barils par jour en 2030... n'existe pas.

Dit autrement, cette courbe, qui illustre le "désir du consommateur", n'est pas compatible avec la vision de l'opérateur pétrolier, qui est pourtant le seul à détenir des informations primaires sur la quantité de pétrole extractible du sol.

Source : Total, 2004

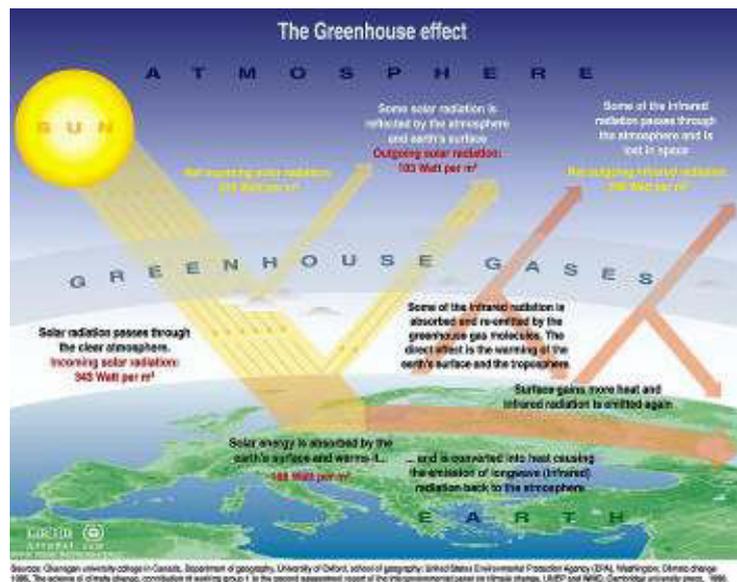
## Evolution du prix du pétrole

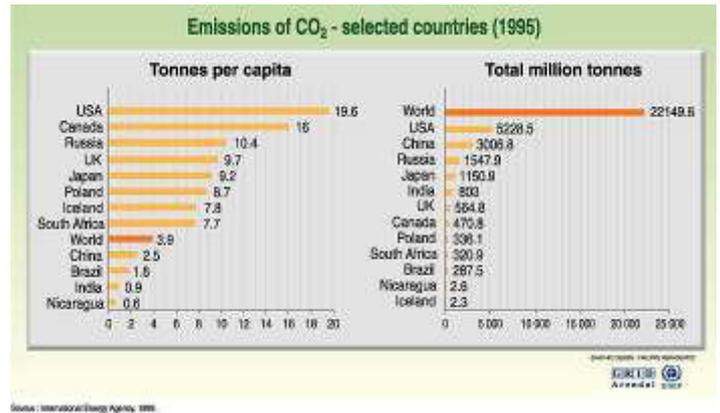
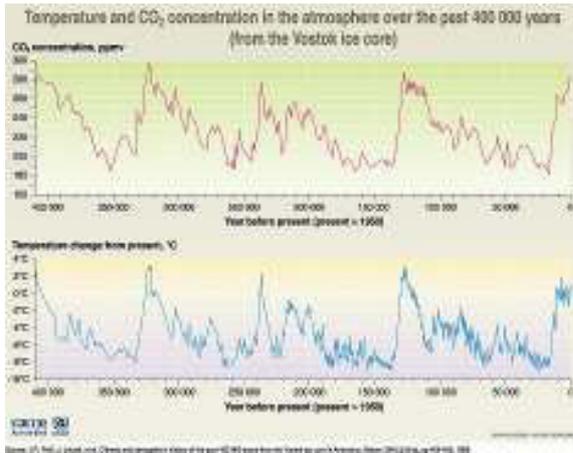
Note : En mai 2008, le pétrole est à 117 € /le baril !!!!



## 1.2 LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Le réchauffement climatique a déjà été étudié dans d'autres cours. Nous n'y reviendrons pas. Rappelons que ce réchauffement est directement relié à la teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère et que cette teneur est elle-même reliée à l'utilisation d'énergie fossile (Gaz, charbon, pétrole). Pour être complet, il faudrait aussi mentionner le problème de la déforestation.

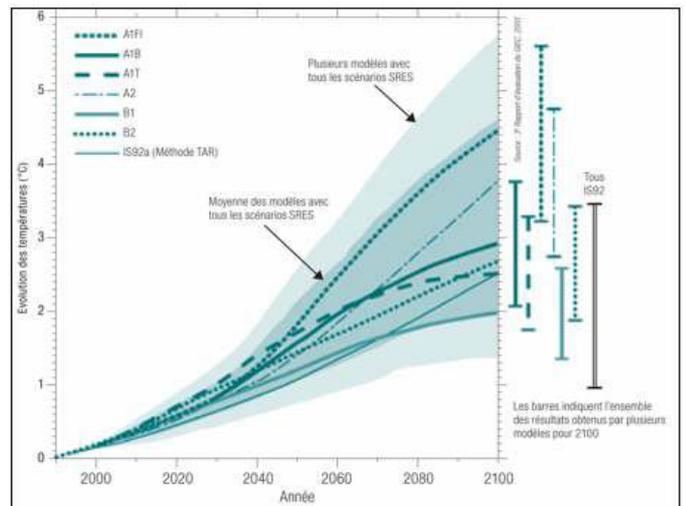




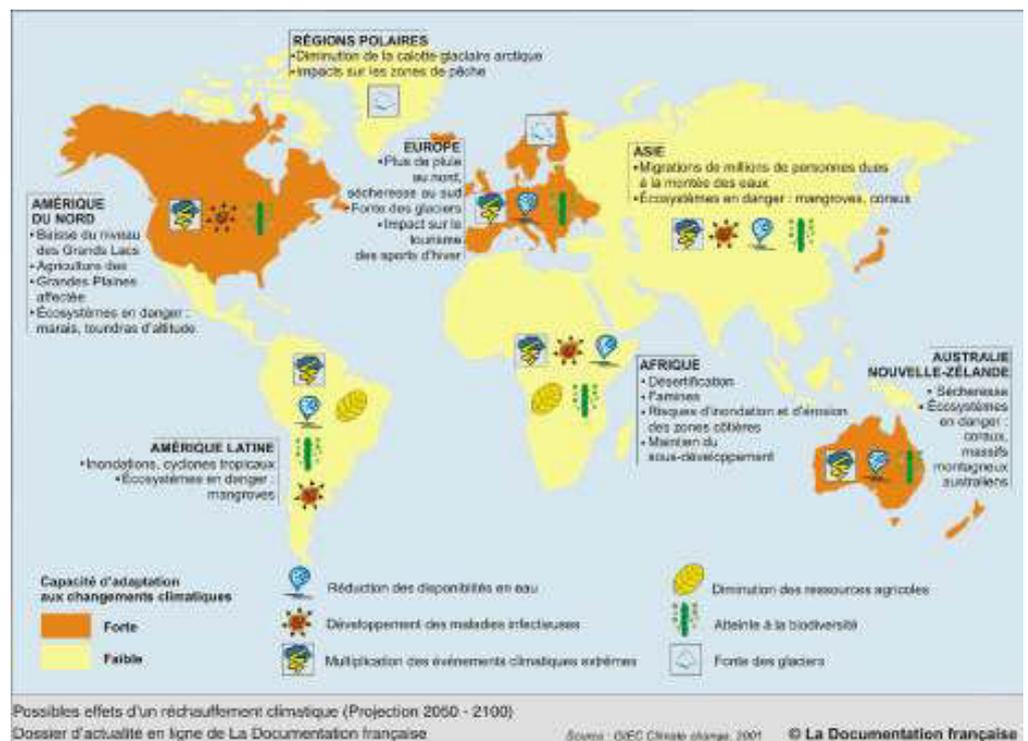
### Evolution des températures moyennes d'ici à 2100

Les prévisions du dernier Rapport du GIEC faisaient état d'un réchauffement moyen de la planète compris entre 1,4 °C et 5,8 °C à la fin de ce siècle. Une fourchette importante qui montre qu'au-delà du constat largement admis par le groupe d'experts internationaux (vitesse du dérèglement climatique observé depuis un peu plus d'un siècle 100 fois plus élevée que les variations naturelles, élévation de la température moyenne sur le globe de 0,6 °C en un siècle, responsabilité de l'homme dans ce phénomène et nécessité d'agir sans plus tarder), les scénarios envisagés dépendent de paramètres extrêmement variables, tels que la croissance économique, l'évolution démographique, les mécanismes de mondialisation ou la sensibilité du climat à une hausse brutale des émissions de gaz à effet de serre.

© Quatrième Rapport d'évaluation du Groupe de travail I du GIEC



### Les effets possibles du réchauffement climatique



## 1.3 LES ENERGIES RENOUVELABLES

C'est une voie possible pour limiter les dégagements de CO<sub>2</sub>

### Qu'est ce que c'est?

**Sont qualifiées d'énergies renouvelables les formes utiles d'énergie provenant d'une source renouvelable, c'est-à-dire dont la valorisation actuelle n'en limite pas la disponibilité future, ou en d'autres termes dont la capacité de renouvellement est supérieure à leur niveau d'exploitation.** Par extension, les systèmes technologiques transformant ces sources sont aussi appelées « énergies renouvelables ».

Par opposition aux énergies fossiles et fissiles qui sont des énergies de stock, les énergies renouvelables sont des énergies de flux : elles se régénèrent en permanence au rythme du soleil et de ses dérivés (le vent, les cours d'eau, les vagues, les courants marins, la chaleur naturelle et la croissance de la biomasse), ainsi que des marées et de la chaleur naturelle de la terre.

Les énergies renouvelables regroupent un grand nombre de systèmes différents selon la source d'énergie valorisée et la forme d'énergie utile obtenue. Les principales filières des énergies renouvelables présentes en Belgique sont reprises dans la liste ci-après :

- Bâtiments basse énergie (Architecture climatique, bâtiments basse énergie, passifs et énergie+) : Optimiser le bâtiment pour limiter les pertes, privilégier les apports solaires passifs utiles et valoriser les sources renouvelables locales
- Biocarburants (Cultures énergétiques, procédés d'extraction) : Biomasse → Carburant
- Biométhanisation : (Unités de biométhanisation, équipements de combustion ou de cogénération) : Biomasse humide → Biogaz → Chaleur utile et/ou électricité
- Chauffage au bois ou à la biomasse (Equipements de combustion) : Bois ou biomasse sèche → Combustible → Chaleur utile
- Electricité ou cogénération à partir de biomasse: (Equipements de cogénération) : Bois ou biomasse sèche → Combustible → Electricité et si cogénération, chaleur utile
- Eolien (Eoliennes sur terre et en mer) : Vent → Energie mécanique → Electricité
- Géothermie et chaleur naturelle (Puits géothermiques, pompes à chaleur) : Chaleur naturelle + électricité → Chaleur utile
- Hydroénergie (Centrales hydroélectriques) : Cours d'eau ou courants marins ou vagues → Energie mécanique → Electricité
- Solaire photovoltaïque (Systèmes solaires photovoltaïques) : Soleil → Electricité. En Belgique, une surface de 10 m<sup>2</sup> de modules photovoltaïques peut fournir annuellement 900 kWh avec une production variable en fonction de la saison: 0,6 kWh par jour en décembre et 4,21 kWh en juin.
- Solaire thermique (Chauffe-eau solaires pour l'eau sanitaire et/ou le chauffage et/ou les piscines ; Réfrigération solaire ; Séchage solaire) : Soleil → Chaleur utile (ou froid)

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 éner perf (Arch climatique) Pompe à chaleur Puits géothermique	Réduction consom. Chaleur Chaleur (électricité)

Il faut insister sur l'importance d'une utilisation rationnelle de l'énergie (URE) qu'elle soit d'origine renouvelable ou pas. (cfr définition de l'utilisation rationnelle de l'énergie).

## Lecture

### L'énergie éolienne en Belgique

Les combustibles fossiles doivent être aujourd'hui utilisés avec économie; de plus, leur combustion libère inmanquablement un certain nombre de produits dangereux, tel le CO<sub>2</sub>, qui est un des gaz responsables de l'effet de serre. La sévère augmentation des rejets de tels gaz a provoqué une modification du climat au niveau mondial. L'énergie éolienne est à ce sujet une énergie propre qui, tout en produisant de l'électricité, ne relâche aucune substance toxique pour l'environnement. Elle est en outre inépuisable...

Cette dernière décennie a vu se développer de nombreux projets d'exploitation de sources énergétiques alternatives. Parmi celles-ci se situent des procédés sûrs et écologiques, comme l'énergie éolienne par exemple. Suite à l'intérêt croissant pour cette alternative, la capacité mondiale d'énergie éolienne est passée de quelques mégawatts en 1981 à presque 10.000 mégawatts en 1998 (pour information, 1 mégawatt est égal à 1000 kilowatts).

En Belgique, la capacité d'énergie éolienne est estimée à quelque 6,1 mégawatts (MW). Elle provient de parcs à turbines et de quelques éoliennes individuelles à Zeebrugge (5,2 MW), Saint-Vith (0,5 MW) et Hasselt (0,4 MW). En comparaison avec d'autres pays, notre royaume peut être considéré comme retardataire à ce niveau. Selon les prévisions, 20.000 MW devraient être produits mondialement pour l'an 2002, ce qui équivaut à la production d'une vingtaine de centrales nucléaires...

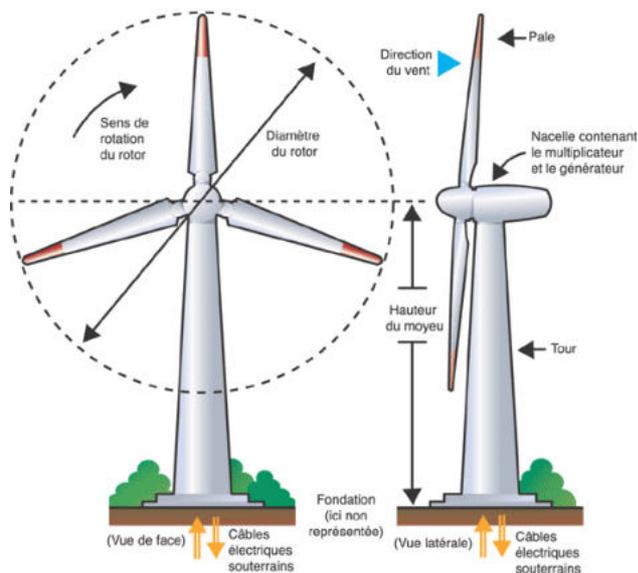


Parc d'éoliennes à Zeebrugge

Néanmoins, la Belgique ne veut pas en rester là. Dans un futur proche, des parcs à éoliennes et des turbines individuelles devraient être installés sur sept sites distincts. En comparaison avec d'autres sources d'énergie, il faut reconnaître que, pour produire une grosse quantité d'électricité, de très nombreuses turbines sont nécessaires. Quand on sait qu'une centrale nucléaire produit entre 900 et 1400 MW et qu'un barrage en produit environ 1800, il faudrait – pour obtenir le même rendement – une superficie impressionnante de terrains découverts pour y construire d'immenses parcs à éoliennes.

Un parc de cent turbines ne produit pas plus de 150 Mw. Si l'on désire changer l'énergie produite par une centrale nucléaire en énergie éolienne, il faut donc nécessairement construire au moins neuf parcs comprenant chacun cent turbines! Et quand on sait qu'un parc actuel ne comprenant que dix-huit turbines exige une superficie de 55 hectares, on se demande où l'on pourrait bien trouver l'espace nécessaire à la construction de ces vastes parcs dans notre petit royaume !

Schémas d'ensemble d'une éolienne



Les turbines modernes sont des constructions énormes perturbant considérablement le paysage. Les pylônes en acier atteignant une hauteur de 60 à 70 mètres et pèsent environ 50 tonnes. Ils sont surmontés par une nacelle (une chambre des machines de 30 tonnes) avec un rotor comprenant deux ou trois pales en polyester, renforcé de fibres en verre ou de charbon, d'une longueur de 30 à 35 mètres chacune et pour un poids total de 10 tonnes. Une telle turbine peut donc atteindre une hauteur de 90 à 105 mètres et un poids de 90 tonnes. Il va de soi que le placement d'un tel mastodonte est une opération complexe et très coûteuse.

La mise en place, par exemple d'une turbine de 600 kW, nécessite une grue de 400 tonnes et pas moins de 200 m<sup>3</sup> de béton et 20 tonnes d'acier sont nécessaires pour les fondations d'une turbine de 100 kW !

Parmi les autres solutions possibles, **l'énergie nucléaire** occupe une place de choix mais rencontre une opposition farouche de certains. Ces notes vont essayer de vous apporter quelques éléments de réponses :

## 2. Radioactivité

### 2.1 DECOUVERTE

*En 1886, le physicien français Henri BECQUEREL découvre fortuitement la radioactivité naturelle en observant qu'un sel d'uranium, posé sur une boîte de plaques photographiques emballées de papier noir provoque néanmoins le «voilage» de celle-ci. Il attribue cette impression des plaques à l'émission, par le sel d'uranium, d'un rayonnement analogue aux rayons X découverts par l'allemand ROENTGEN en 1895.*



En 1897, Pierre et Marie CURIE révèlent la radioactivité du thorium et, après de longues et pénibles recherches effectuées dans des conditions matérielles difficiles, découvrent deux éléments beaucoup plus radioactifs que l'uranium: le polonium et le radium.

Jusqu'en 1935, s'écoule alors une période au cours de laquelle les physiciens se préoccupent de dégager les caractéristiques du rayonnement nucléaire (encore appelé radioactif) et de confronter les résultats expérimentaux aux modèles qui se mettent en place pour décrire la constitution intime de la matière.

La frontière de la physique se déplace alors vers des études à l'échelle inférieure au rayon atomique.

Cette étude jusqu'alors confinée aux laboratoires, débouche ensuite sur de multiples applications pratiques. L'objectif est d'utiliser et de maîtriser l'immense réservoir d'énergie contenu dans le noyau. Les perspectives offertes par ce nouveau domaine d'investigation conduisent les belligérants de la guerre 1939-45 à donner une brusque accélération aux recherches.

## 2.2 STRUCTURE DU NOYAU DE L'ATOME

Un atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons.

Le nuage électronique est constitué d'un nombre  $Z$  (appelé : nombre atomique) d'électrons portant chacun une charge électrique négative.

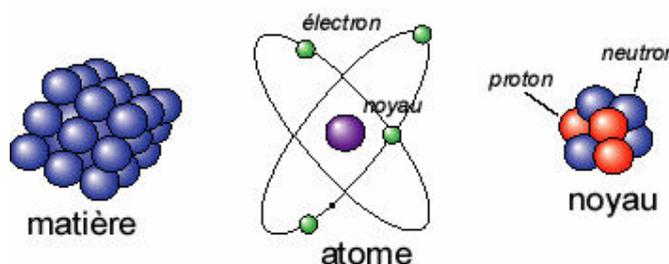
Le noyau (aussi appelé nuclide) est constitué de  $A$  nucléons de 2 sortes:

- $Z$  protons de charge électrique positive
- $N$  neutrons de charge électrique nulle

$$A = Z + N$$

***La cohésion du noyau, malgré la répulsion des protons, est assurée par des forces nucléaires très grandes. Ces forces prennent, à courtes distances, le pas sur les forces de répulsion de Coulomb qui existent entre particules de mêmes charges.***

Notons que les masses du proton et du neutron sont identiques et 2000 fois plus grande que celle de l'électron.



## 2.3 LES PHENOMENES NUCLEAIRES

Ce sont des phénomènes qui concernent le noyau de l'atome.

Comme en chimie, le nombre  $Z$  d'électrons détermine le nom de l'élément chimique, en physique nucléaire, le nom du noyau sera déterminé par le nombre  $Z$  de protons.

Le noyau se note 
$$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$$

Les 92 éléments sont répertoriés dans le tableau de Mendélèev qui contient pour chaque atome des données importantes.

Ainsi, la masse atomique relative qui indique combien de fois l'atome est plus lourd que l'atome d'hydrogène. ( $Z = 1$ )

Pour l'hélium ( $Z = 2$ ), on a que la masse atomique relative est de 4. Ceci est dû à la présence de 2 neutrons dans le noyau

**On voit de suite que la masse atomique relative donne en arrondissant, le nombre de nucléons contenu dans le noyau de l'atome.**

Exemples

Elément	Z	N	A = Z + N	Noyau
Hydrogène	1	0	1	${}^1_1\text{H}$ ou ${}^1_1\text{p}$
Hélium	2	2	4	${}^4_2\text{He}$
Oxygène	8	8	16	${}^{16}_8\text{O}$
Uranium	92	146	238	${}^{138}_{92}\text{U}$

Un neutron se note  ${}^1_0n$  et un électron  ${}^0_{-1}\beta$  ou  $e^{-1}$

## 2.4 LES ISOTOPES

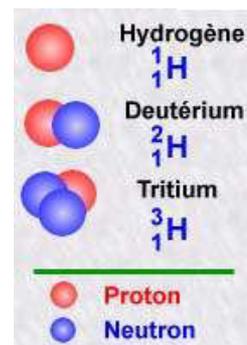
**Certains noyaux possèdent le même nombre Z de protons (ils ont donc le même nom) mais un nombre de neutrons N différent. On les appelle les isotopes d'un élément chimique.**

Les isotopes de l'hydrogène  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^3_1\text{H}$

Les isotopes de l'oxygène  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{17}_8\text{O}$ ,  ${}^{18}_8\text{O}$

Les isotopes de l'uranium  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{238}_{92}\text{U}$

Les 2 uraniums contiennent 92 protons mais le premier contient 143 neutrons et le second 146.



## 2.5 LA RADIOACTIVITE : LA STABILITE DU NOYAU

La plupart des nuclides sont stables c'est à dire qu'ils restent les mêmes au cours du temps.

**Certains noyaux d'atomes sont instables c'est-à-dire qu'ils ont trop d'énergie en eux et les forces de cohésion nucléaires sont insuffisantes pour maintenir la cohésion de l'ensemble.**

**A un certain moment, ces noyaux vont être sujet à une réaction nucléaire.**

**Une réaction nucléaire est un phénomène au cours du quelle, il y a une modification du noyau de l'atome. Cette modification du noyau a pour effet global de redonner un ensemble plus stable.** Lorsqu'un noyau instable se casse, on dit qu'il se désintègre. Le noyau est dit radioactif ou on parle de radionucléide ou de radioisotope.

**La ou les particules émises constituent le rayonnement radioactif**

La modification du noyau aussi appelée transmutation ou désintégration peut-être:

- **spontanée:** un noyau se transforme spontanément en un autre noyau, en expulsant une ou plusieurs particules: c'est la radioactivité naturelle.  
Cette radioactivité peut s'observer dans la nature car la croûte terrestre renferme de l'uranium qui est un élément radioactif
- **provoquée par collision d'une particule incidente sur un noyau:** c'est la radioactivité artificielle.

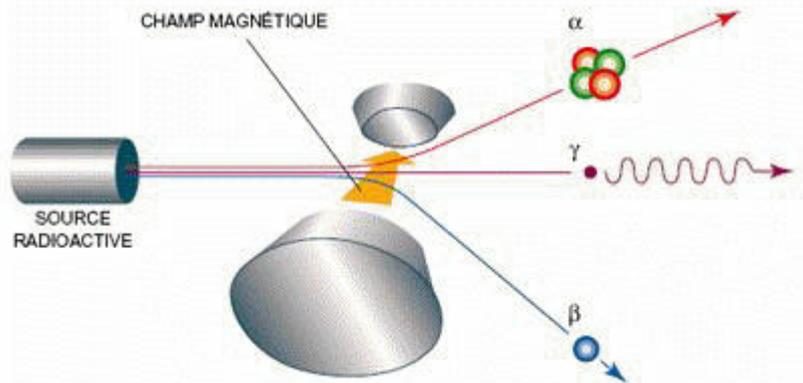
C'est le cas dans les centrales nucléaires mais aussi lors de l'explosion de bombe A

## 2.6 LES RAYONNEMENTS RADIOACTIFS $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ (ALPHA, BETA, GAMMA)

Lors de la désintégration d'un radioisotope, 3 réactions sont possibles mais pour chaque réaction nucléaire on doit avoir :

- conservation du nombre de masse  $A$
- conservation du nombre  $Z$

D'emblée, la radioactivité a surpris : dès 1900, on savait que les rayonnements émis par l'Uranium et ses descendants avaient trois composantes, baptisées : "alpha"  $\alpha$ , "bêta"  $\beta$  et "gamma"  $\gamma$  séparables par l'action d'un champ magnétique comme indiqué symboliquement dans l'image ci-contre:



### 2.6.1 Désintégration alpha ou radioactivité alpha

Pour retrouver sa stabilité, le noyau éjecte une particule alpha ou noyau d'hélium  ${}^4_2\alpha$  avec réorganisation du noyau. La particule  $\alpha$  est une particule très lourde.

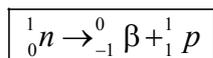
Exemple :  ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^4_2\alpha + {}^{234}_{90}\text{Th}$

On dit que l'uranium 238 est radioactif  $\alpha$ . Il se transforme en thorium 234 par émission alpha

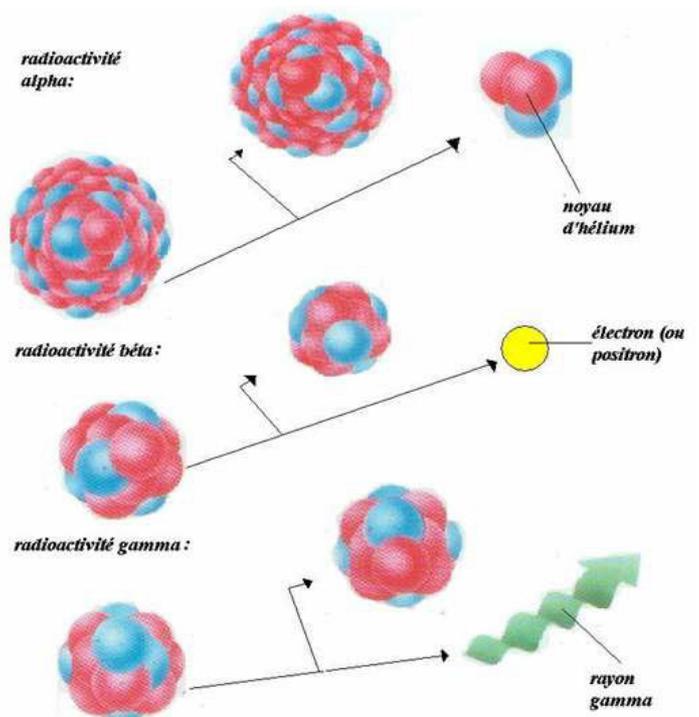
### 2.6.2 Désintégration bêta ou radioactivité bêta

En fait la particule bêta n'est rien d'autre qu'un électron mais attention, il ne provient pas des couches externes de l'atome mais il est « fabriqué » à l'intérieur du noyau de l'atome par une transformation particulière :

un neutron se transforme en un proton avec émission d'un électron.



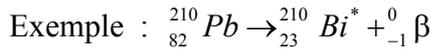
Exemples



### 2.6.3 Désintégration gamma ou radioactivité gamma

*Les émissions alpha et bêta transforment un radioisotope en un autre nuclide qui souvent possède encore trop d'énergie pour être stable. Ce noyau dit excité peut retomber dans un état d'énergie plus basse en émettant de l'énergie sous forme d'une onde dite onde électromagnétique gamma.*

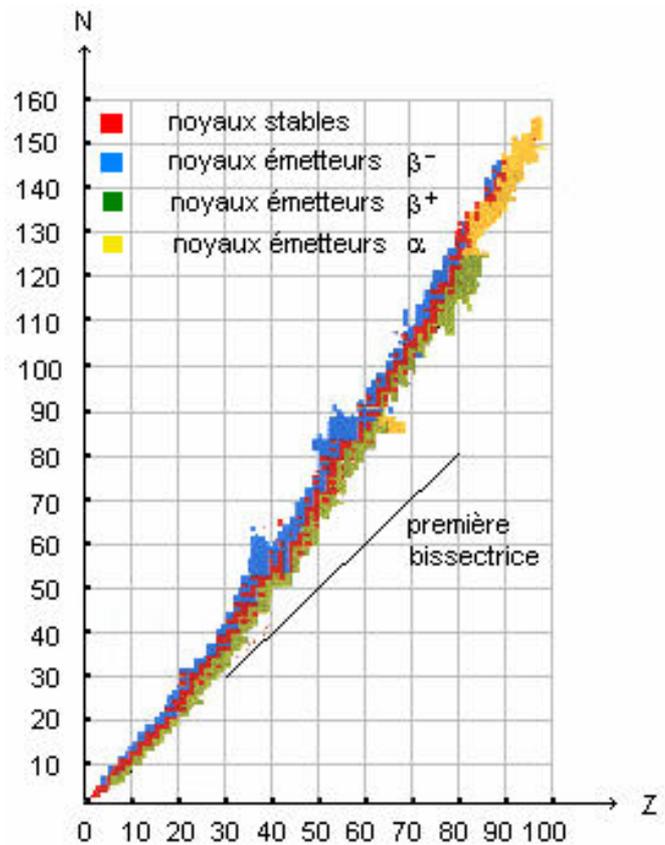
*Une désintégration gamma n'entraîne donc aucune modification de la composition du noyau. C'est ce rayonnement  $\gamma$  qui constitue le principal danger dans la radioactivité.*



${}_{23}^{210}\text{Bi}^*$  est un atome de bismuth dans un état excité. Il retourne dans son état normal en émettant un  $\gamma$  :

$${}_{23}^{210}\text{Bi}^* \rightarrow {}_{23}^{210}\text{Bi} + \gamma$$

Les données expérimentales montrent que 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. On pense que 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. Il y a donc seulement une partie des isotopes qui sont stables. Les autres vont se désintégrer jusqu'à obtenir une structure stable.



## 2.7 ACTIVITE D'UNE SOURCE RADIOACTIVE

*L'activité d'une source radioactive est le nombre de noyaux qui se désintègrent par seconde. L'unité est le becquerel (Bq) qui correspond à la désintégration d'un noyau par seconde.*

*On utilise aussi le curie (Ci) =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq*

### Exemples

- L'activité de la quantité d'iode 131 injecté en une seule fois dans l'organisme pour un examen de la thyroïde est de 740.000 Bq.
- L'organisme humain possède une activité naturelle de 12.000 Bq due à la présence de potassium 40.
- Une semaine après l'accident de Tchernobyl, l'activité de l'air en Belgique était de 60 Bq/m<sup>3</sup>
- (seuil dangereux = 400 Bq/m<sup>3</sup> d'air)

## 2.8 DEMI-VIE T D'UN RADIOISOTOPE

Quel que soit le type de désintégration, un nuclide radioactif disparaît au fil du temps.

Sa masse diminue ainsi que son activité.

L'expérience montre que les radioisotopes ne disparaissent pas tous au bout d'un même temps.

### Exemple

Supposons un groupe de  $N_0$  spectateurs assistant à un match de football.

Le match étant nul, après 10' la moitié des spectateurs quitte le stade → il en reste  $N_0 / 2$

Après 20' la moitié des restants quitte le stade → il en reste  $N_0 / 4$

Après 30' la moitié des restants quitte le stade → il en reste  $N_0 / 8$

Après 40' la moitié des restants quitte le stade → il en reste  $N_0 / 16$

Après 50' la moitié des restants quitte le stade → il en reste  $N_0 / 32$  .....

Après  $k \cdot 10'$ , il en reste  $N_0 / 2^k$

On voit que les 10' représente le temps au bout duquel la moitié des spectateurs initialement présent sont partis.

**En nucléaire, la demi-vie  $T$  représente le temps au bout duquel la moitié des noyaux initialement présents s'est désintégrée.**

La valeur  $T$  varie d'un élément à un autre. Pour certains, il est de l'ordre du milliard d'années; pour d'autres, il est de l'ordre de la microseconde.

Exemple d'illustration de la demi-vie

La demi-vie de l'iode 131 est de 8 jours.

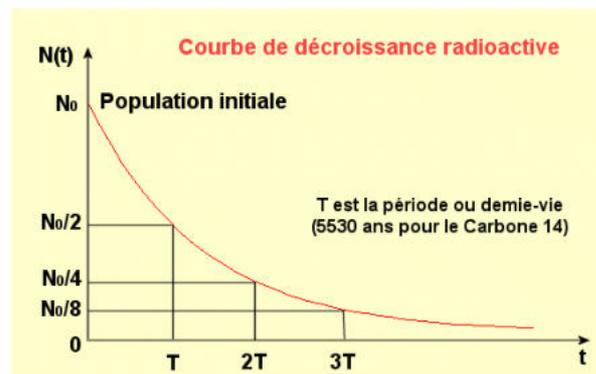
Cela signifie que si on injecte aujourd'hui dans notre corps, une dose dont l'activité est de 700.000 Bq, alors:

- dans 8 jours, l'activité sera de 350.000 Bq
- dans 16 jours, l'activité sera de 175000 Bq
- dans 24 jours, l'activité sera de 87500 Bq dans
- dans 32 jours, l'activité sera de 43750 Bq
- dans 40 jours, l'activité sera de 21875 Bq
- dans 7•8 jours, l'activité sera de +- 5500 Bq

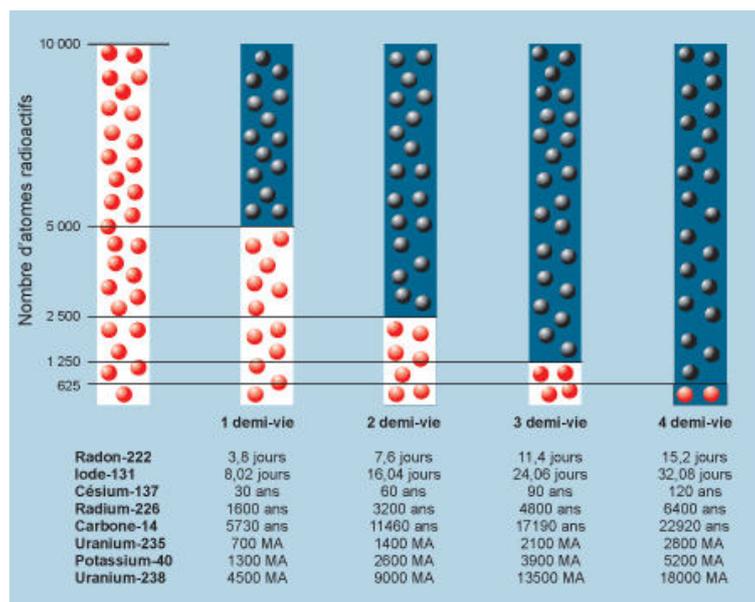
**Pour que l'activité soit réduite d'un facteur 100, il faut attendre +-10 périodes**

*Variation du nombre  $N$  d'atomes radioactifs en fonction du temps  $t$ .*

*No atomes radioactifs sont présents à l'instant initial  $t = 0$  et  $T$  est la demi-vie de l'élément*



Émetteur	Rayonnement	Demi-vie
$^{238}\text{U}$	$\alpha$	$4,5 \cdot 10^9$ ans
$^{226}\text{Ra}$	$\alpha$	1 600 ans
$^{213}\text{Po}$	$\alpha$	4 $\mu\text{s}$
$^{14}\text{C}$	$\beta$	5 730 ans
$^{131}\text{I}$	$\beta$	8 jours



## 2.9 POUVOIR DE PENETRATION DES RAYONNEMENTS

Une radiation (alpha, bêta, gamma) s'arrête lorsque toute son énergie de départ a été transférée à la matière qui l'entoure.

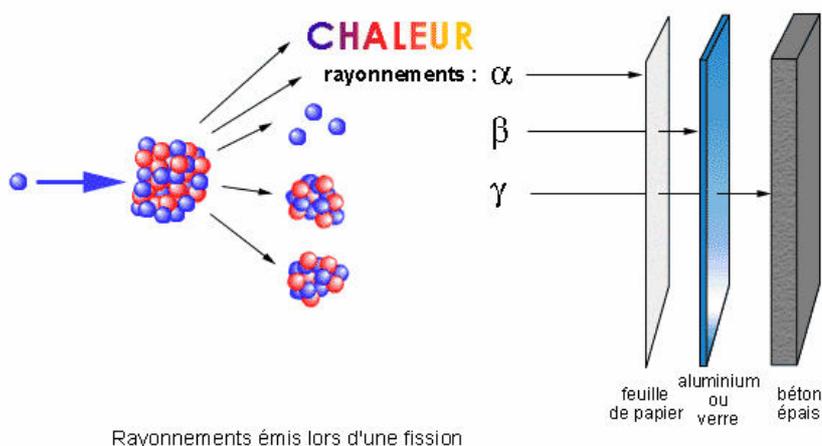
Pour *l'alpha*, elle perd rapidement son énergie et sa pénétration dans un milieu est faible;  
(*Quelques cm d'air, 0.1 mm d'eau, une feuille de papier peut l'arrêter*)

Pour *le bêta*, il perd moins rapidement son énergie et sa pénétration est donc plus importante;  
(*0.4 cm d'eau, une feuille d'aluminium de 2mm peut l'arrêter*)

Le *gamma* est encore plus pénétrant;

(*Il faut 10 cm d'eau, quelques cm de plomb, 1 m de béton pour les absorber ou 4m d'eau*)

Notons qu'à énergie de départ équivalente, les alphas sont 20 fois plus efficaces pour détruire les cellules que les bêtas ou les gammas.



## 2.10 MOYENS DE SE PROTEGER

En pratique pour se protéger de ces rayonnements, on place d'épais écrans de plomb entre les substances radioactives et les opérateurs. Ceux-ci doivent porter des gants et des tabliers en tissus contenant des sels de plomb ainsi que des lunettes en verre de cristal (silicate de potassium et de plomb).

Les sources sont placées dans des gaines en plomb et les rayons ne peuvent en sortir que par un étroit canal.

## 2.11 LES GRANDEURS USUELLES EN NUCLEAIRE

1. Le **becquerel** mesure l'activité de la source.
2. Pour se protéger des effets des rayonnements ionisants, il est plus important de connaître la quantité d'énergie susceptible d'être absorbée par l'organisme que celle qui a été émise : on parle alors de dose absorbée. La dose absorbée correspond à la quantité d'énergie absorbée par unité de masse exposée. Sa mesure s'exprime en **gray (Gy)**, unité portant le nom du physicien anglais Harold Gray (1905- 1965) et correspondant à **1 joule par kilogramme (J/kg)**.

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	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

## Exemples d'ordres de grandeur de doses absorbées



2. L'impact biologique d'un rayonnement ionisant ne dépend pas seulement de l'énergie absorbée par les cellules vivantes, mais aussi de la nature du rayonnement qui détermine la manière dont cette énergie est déposée tout au long de son parcours. A énergie absorbée égale, des rayonnements ionisants n'ayant pas les mêmes caractéristiques physiques n'ont pas le même impact biologique. Pour apprécier l'impact biologique des rayonnements sur un organe ou un tissu lors d'une exposition uniforme, on calcule une dose dite équivalente, qui est le produit de la dose absorbée par un facteur de pondération radiologique sans dimension caractéristique du rayonnement. Cette dose est alors exprimée en **sievert (Sv)**, du nom du radiobiologiste suédois Rolf Sievert (1896 – 1966).

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

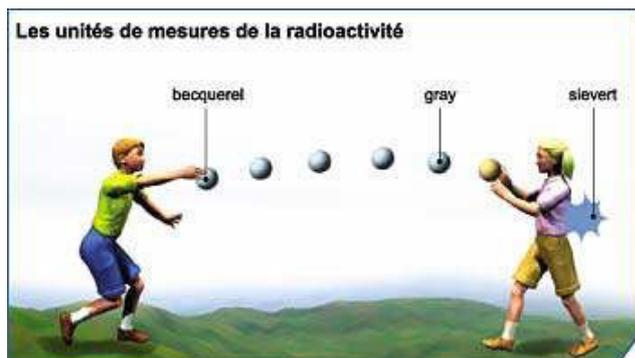
$$\text{DBE} = \text{FEB} \cdot \text{dose absorbée}$$

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

## Exemples

- 1 mSv = 17 mois à Paris = 12 aller-retour Paris-New-York = 1 journée à bord de Mir
- 1 Sv = 1000 radiographies médicales du corps entier soit 14 radiographies par an pendant 70 ans
- Chacun d'entre nous reçoit une DBE de
  - 300 à 1300  $\mu$ Sv / an provenant de la croûte terrestre (radioactivité naturelle)
  - 250  $\mu$ Sv / an provenant des radioéléments présents dans notre organisme
- Réglementation
  - 50 mSv / an pour les personnes travaillant dans un cadre nucléaire. 5 mSv / an pour les autres

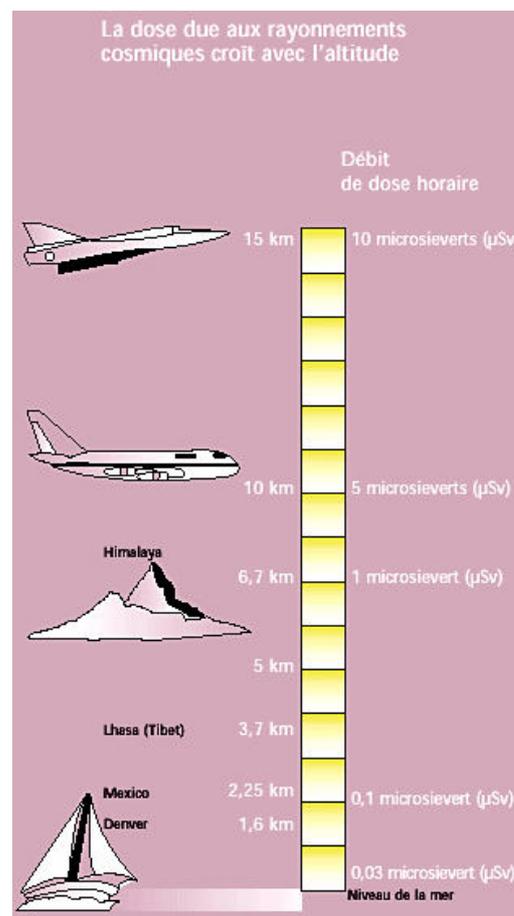
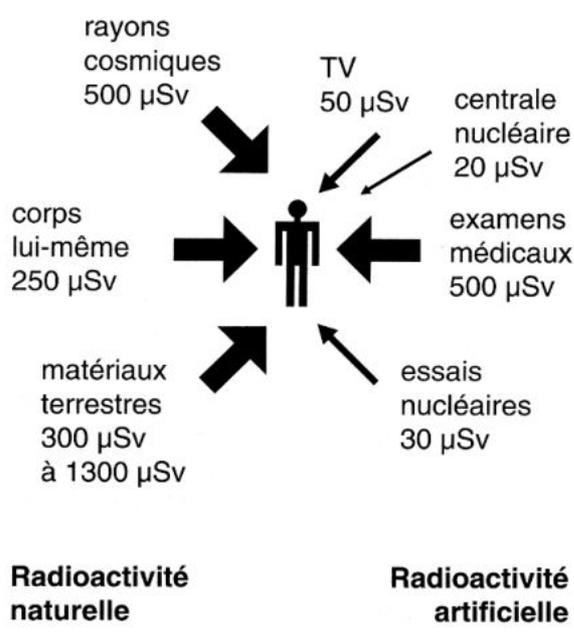




La relation entre les trois unités de mesure de la radioactivité : un enfant lance des objets en direction d'une camarade. Le nombre d'objets envoyés peut se comparer au becquerel (nombre de désintégrations par seconde) ; le nombre d'objets reçus par la camarade, au gray (dose absorbée) ; les marques laissées sur son corps selon la nature des objets, lourds ou légers, au sievert (effet produit).

## 2.12 EXEMPLES DE DOSES RADIOACTIVES

Rappel : 100 rem = 1 sievert  
1 mrem =  $10^{-5}$  Sv



## 2.13 EFFETS DES RAYONNEMENTS RADIOACTIFS SUR L'HOMME

Les rayonnements sont nocifs pour l'organisme. Pourquoi?

Lorsque les rayonnements traversent la matière, ils cèdent une partie de leur énergie aux électrons des atomes qu'ils percutent. Ils arrachent un ou des électrons à ces atomes.

Ces derniers sont donc ionisés d'où le nom de **radiations ionisantes** donné aux rayonnements nucléaires.

Chaque cellule traversée par les radiations se retrouve avec des milliers d'atomes ionisés.

La molécule d'ADN qui porte le patrimoine génétique des cellules, est unique dans chaque cellule. Une fois détruite, elle n'est pas remplaçable.

A très forte dose d'irradiation, les dégâts peuvent conduire à la mort de la cellule.

**C'est par une prise de sang que l'on peut déterminer si une personne a été irradiée.**

**On regarde si les cellules des globules blancs ont des chromosomes forme de X (forme**

*normale). Si il y a eu irradiation, les chromosomes détruits se réparent mais avec parfois des anomalies qui peuvent conduire à l'apparition de cancers et à des cellules mutantes*

On parle *d'irradiation* lorsqu'un objet ou un individu est soumis à des rayonnements issus d'une source extérieure. L'effet d'une irradiation dépend de la dose et de sa durée.

On parle *de contamination* lorsqu'il y a dépôt de substances radioactives sur ou à l'intérieur du corps.

## Conséquences

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

## 2.14 APPLICATIONS DES RADIOISOTOPES

### 2.14.1 Les traceurs

*Ce sont des radioéléments introduits dans les substances que l'on veut observer. Les molécules sont ainsi marquées et elles sont facilement observables par les rayonnements qu'elles fournissent.*

Applications: voir document annexe

### 2.14.2 Les sources

*Ce sont des radioéléments dont les rayonnements sont utilisés pour explorer l'intérieur des objets ou pour modifier la matière sur laquelle on les envoie.*

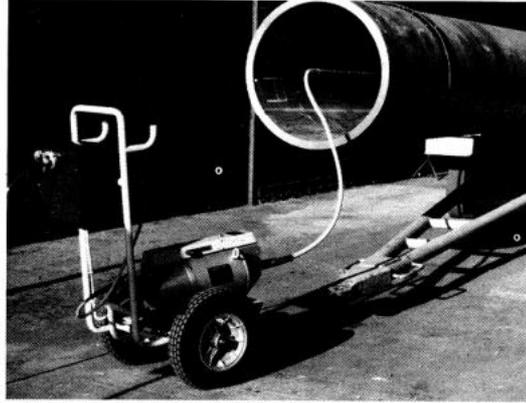
Applications: voir document annexe

Les rayonnements émis par les radionucléides naturels ou artificiels obtenus par réactions nucléaires trouvent de multiples usages.

La *gammagraphie* ne diffère en rien, dans son principe, de la radiographie par des rayons X : l'image, recueillie sur une plaque photographique, d'une pièce métallique soumise à un rayonnement  $\gamma$  révèle et décèle les défauts d'un organe. Toutes les soudures des cuves des réacteurs nucléaires sont contrôlées à l'aide de ce procédé. Les avantages principaux de cette méthode sont l'autonomie de la source ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ), sa fiabilité, ses faibles dimensions; de plus, elle ne nécessite pas d'installation électrique.

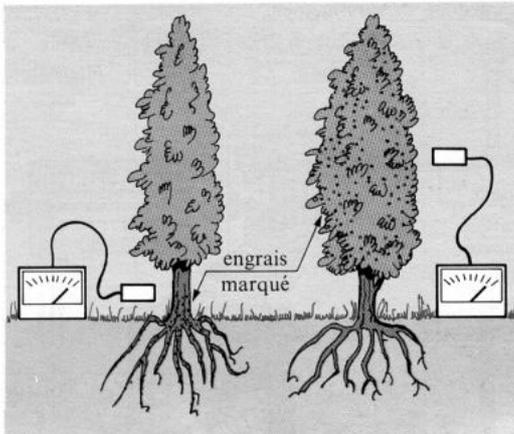
La *bétagraphie* (utilisation du rayonnement  $\beta$ ) permet l'examen d'objets minces, le contrôle d'épaisseurs, etc.

Les particules  $\alpha$  et  $\beta$ , les rayons  $\gamma$  ont de nombreux effets biologiques : en traversant la matière, ils ionisent les molécules ou atomes qu'ils rencontrent sur leur passage et sont donc dangereux pour la matière vivante. Mais, bien utilisés, les effets peuvent être positifs. Une irradiation de végétaux peut provoquer des changements génétiques importants : on a obtenu des pailles de blé, d'orge et de riz mieux adaptées à la moisson mécanique et plus résistantes à la verse. La conservation des denrées alimentaires et des produits pharmaceutiques est un domaine où la contribution des rayons  $\gamma$  a apporté une



Gammagraphie industrielle.

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



6. Étude de l'absorption d'un engrais au moyen d'un traceur radioactif.

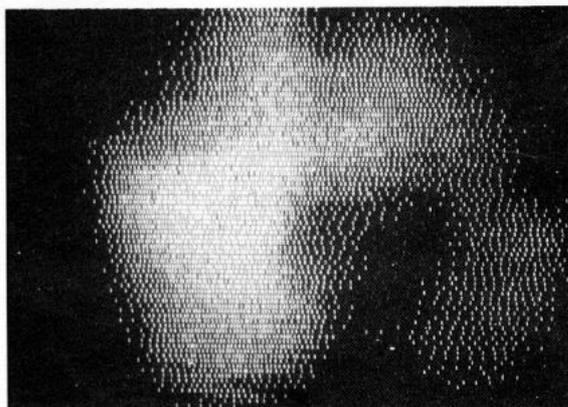
solution originale; en effet, les photons  $\gamma$  ne créent pas d'atomes radioactifs. Aussi, une irradiation  $\gamma$  permet, par exemple, de détruire les insectes dans les denrées stockées, d'éliminer les micro-organismes dans les céréales, les œufs, la viande, etc. Des millions d'articles sont radiostérilisés : seringues, pansements, draps, prothèses, etc. Enfin, la médecine utilise les rayonnements  $\gamma$  à des fins thérapeutiques (cancer). Également, on traite directement certaines cellules malades par voie métabolique : pour cela, il faut préparer des molécules marquées avec un émetteur  $\beta$  et susceptibles d'être fixées sélectivement par le tissu pathologique. De cette façon, on traite assez bien l'hyperthyroïdie, le cancer du corps thyroïde, la maladie de Vaquez (ou polyglobulie) au moyen de phosphore radioactif.

Les radionucléides sont utilisés non seulement pour l'effet de leur rayonnement, mais aussi pour détecter la présence invisible d'un corps auquel on les a mélangés : c'est la méthode des traceurs ou des indicateurs radioactifs (fig. 6).

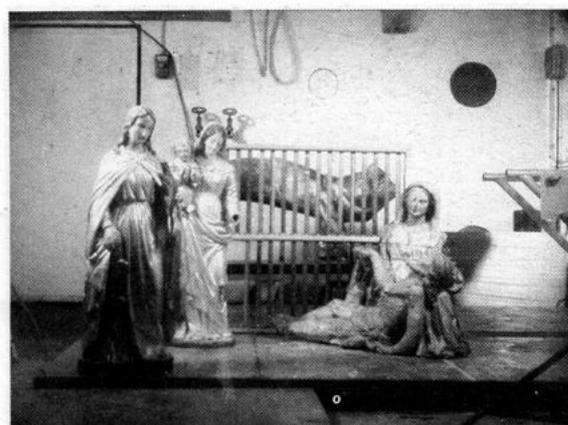
On peut se servir également de traceurs pour élucider

## Scintigraphie





La scintigraphie est utilisée en médecine pour analyser le fonctionnement de certains organes; ici, une scintigraphie du foie.



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

On peut se servir également de traceurs pour élucider divers mécanismes chimiques ou biologiques. En agronomie, l'utilisation de traceurs a permis de faire progresser les connaissances en matière d'absorption ou de transport de minéraux. Ainsi, des atomes de phosphore radioactif incorporés dans un engrais se comporteront dans une plante de la même façon que les atomes stables de phosphore. Le botaniste pourra suivre à la trace l'assimilation de l'engrais par la plante, et pourra en déduire son efficacité, la date la plus favorable pour le répandre sur le sol, etc. Citons l'assimilation du dioxyde de carbone par les plantes vertes au cours de la photosynthèse.

Avec l'utilisation des traceurs, le biologiste et le médecin ont également trouvé un moyen d'investigation puissant pour pénétrer au cœur des organismes vivants. Ainsi, les radioéléments vont participer aux métabolismes de la même façon que les éléments naturels : l'iode  $^{131}$  va être absorbé au même titre que l'iode naturel. On pourra donc suivre tout le cheminement de l'iode au cours de son assimilation et contrôler le fonctionnement de la glande thyroïde qui synthétise et sécrète les hormones iodées responsables de nombreuses actions au niveau des cellules. On peut également étudier la morphologie d'un organe rendu radioactif par fixation d'un radioélément émetteur  $\gamma$  ou  $\beta$ . Grâce à divers détecteurs, on obtient une véritable image de l'organe : c'est la scintigraphie. La chirurgie du cerveau utilise merveilleusement ces méthodes : le phosphore radioactif se localise dans les tumeurs difficiles à différencier du tissu sain; le chirurgien peut alors les cerner au cours de l'opération même, à l'aide de compteurs Geiger spéciaux sensibles à l'émission  $\beta$ .

L'analyse chimique utilise couramment les radioéléments. Le dosage basé sur la radioactivité est sensible, simple et rapide. On peut ainsi doser des éléments à l'état de traces ( $10^{-10}$  mol.  $\ell^{-1}$ ), non dosables chimiquement : on dose de cette façon les hormones de croissance, l'insuline dans le sang, etc.

## Autres applications

### Détecteur à incendie

Les détecteurs de fumée utilisent une source d'américium  $^{241}$  (émetteur  $\alpha$ , de demi-vie environ 450 ans) dont l'activité est de quelques dizaines de kBq. L'air d'une petite cellule est rendu faiblement conducteur par la présence de la source radioactive; si de la fumée pénètre dans cette chambre, la conductibilité de l'air ionisé diminue, ce qui provoque le déclenchement de l'alarme.

### Conservation de denrées alimentaires

Dans ce domaine, la contribution des rayons  $\gamma$  est particulièrement importante. Citons, par exemple:

- la germination de l'oignon ou de la pomme de terre empêchée par une dose de 150 Gy
- la destruction d'insectes dans les denrées stockées grâce à une dose de 250 à 1 000 Gy
- l'élimination plus ou moins complète de microorganismes dans les céréales, œufs, viandes et poissons frais (2500 Gy).

Citons encore l'utilisation de rayonnements pour:

- la mesure de l'épaisseur des neiges et des eaux
- la détermination de la densité des sédiments déposés dans les lacs

- la détection des fuites dans les canalisations enterrées, par l'introduction d'un gaz radioactif
- le traitement de tumeurs par des aiguilles d'iridium...

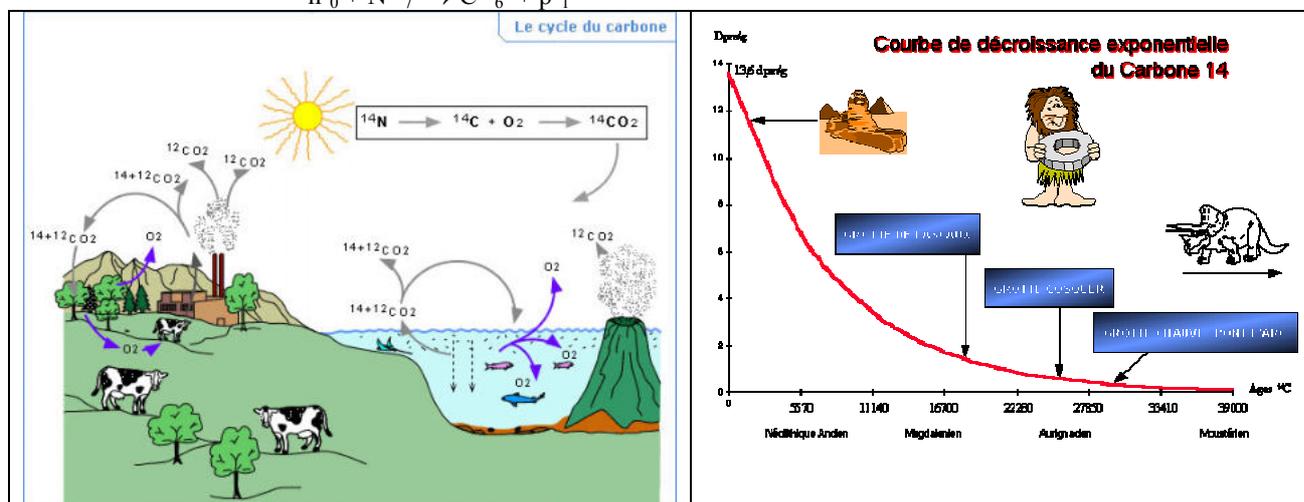
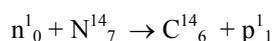
## Lecture

### La datation au carbone 14

La datation par isotopes radioactifs est une méthode utilisée pour déterminer l'âge de matériaux (vieux documents, morceaux de bois, de coquilles, de charbons, restes fossiles...) contenant des radio-isotopes. La méthode consiste à évaluer le rapport entre la quantité d'atomes d'une famille radioactive présents dans le matériau, et la quantité de la même sorte d'atomes présents dans un matériau similaire actuel.

**La substance la plus fréquemment utilisée pour la datation est le carbone 14 qui permet de déterminer l'âge d'un matériau jusqu'à 70 000 ans.**

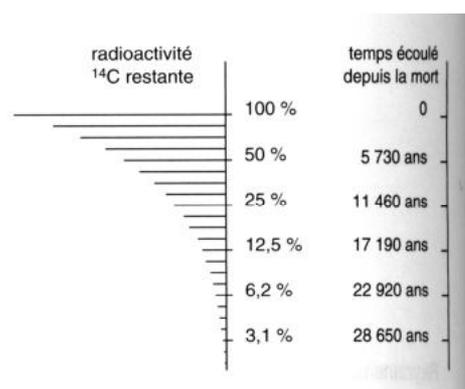
Le carbone 14 radioactif est produit continuellement dans l'atmosphère par l'action de rayons cosmiques sur l'azote de l'air:



La concentration de ce radiocarbone dans l'air est pratiquement constante depuis des millénaires, car il se forme, par unité de temps, autant d'atomes de carbone 14 qu'il en disparaît par radioactivité. Tout comme le carbone 12 non radioactif, ce radiocarbone se combine à l'oxygène atmosphérique pour former du gaz carbonique que les végétaux absorbent par la photosynthèse, tant qu'ils sont vivants. Comme les animaux se nourrissent de végétaux, finalement tous les organismes vivants contiennent une proportion identique (très faible) de carbone 14. Le rapport  $C^{14} / C^{12}$  reste constant. Mais après la mort du tissu, il n'y a plus d'absorption de carbone 14 radioactif.

Celui-ci disparaît lentement, avec une demi-vie de 5730 années en émettant des rayonnements  $\beta$  détectables par exemple par un compteur Geiger.

En mesurant la quantité restante  $C^{14} / C^{12}$ , on peut déterminer la date de la mort



La technique de datation est en fait très complexe, car:

- la proportion de carbone 14 est très faible:  $1,3 \cdot 10^{-10}$  % du carbone total
- l'activité des échantillons est très faible
- l'incertitude des mesures n'est pas minime, à cause du bruit de fond
- la méthode suppose que la production de radiocarbone dans l'atmosphère est constante, ce qui n'est pas rigoureusement vrai.

## 3. Energie nucléaire

### 3.1 INTRODUCTION

La découverte de la radioactivité et celle de l'électron ont révélé que les atomes ne sont pas indivisibles, mais contiennent plusieurs particules. La mesure précise des masses des atomes a fait découvrir l'énergie de liaison colossale existant dans les noyaux.

Nous allons voir dans ce chapitre que cette énergie de liaison nucléaire est l'origine du considérable dégagement d'énergie lors des **réactions nucléaires**, par exemple lors des désintégrations radioactives, ou des réactions de fusion ou de fission.

### 3.2 LES UNITES 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  $^{12}_6\text{C}$*

On sait qu'une mole (=  $6.10^{23}$  atomes) d'atomes de  $^{12}_6\text{C}$  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 :

$M_{\text{proton}}$	= 1.0073 uma	= 1 uma
$M_{\text{neutron}}$	= 1.0087 uma	= 1 uma
$M_{\text{électron}}$	= 0.0005 uma	= 1 uma / 1836

Pour les autres atomes : voir table

Calculons à titre d'exercice la masse en uma d'un atome d'hélium ( $2p + 2n + 2e$ )

masse des constituants		masse mesurée de $^4_2\text{He}$
$2m_p$	= 2.1,0073 = 2,0146 uma	
$2m_n$	= 2.1,0087 = 2,0174 uma	
$2m_e$	= 2.0,0005 = 0,0010 uma	
total	<u>4,0330 uma</u>	4,0026 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 de quelques atomes,  $E_L$   
et  $E_L$  par nucléon de quelques noyaux**

isotope	masse de l'atome (en uma)	abondance (en %)	mode de désintégration	défaut de masse du noyau (en uma)	$E_L$ (en MeV)	$E_L$ par nucléon (en MeV)
$^1_1\text{H}$	1,0078	99,985	-			
$^2_1\text{H}$	2,0141	0,015	-	0,0024	2,23	1,1
$^3_1\text{H}$	3,0161	-	$\beta$	0,0091	8,47	2,8
$^4_2\text{He}$	4,0026	100	-	0,0304	28,3	7,1
$^6_3\text{Li}$	6,0151	7,42	-	0,0344	32,0	5,3
$^7_3\text{Li}$	7,0160	92,58	-	0,0422	39,3	5,6
$^{12}_6\text{C}$	12,0000	98,89	-	0,0990	92,17	7,7
$^{13}_6\text{C}$	13,0034	1,11	-	0,1043	97,1	7,5
$^{14}_6\text{C}$	14,00324	-	$\beta$	0,1132	105,4	7,5
$^{14}_7\text{N}$	14,00307	99,63	-	0,1124	104,6	7,5
$^{60}_{27}\text{Co}$	59,9338	-	$\beta$ et $\gamma$	0,5639	525,0	8,75
$^{133}_{55}\text{Cs}$	132,9054	100	-	1,202	1119	8,4
$^{195}_{77}\text{Ir}$	192,9629	62,7	-	1,647	1533	7,9
$^{210}_{82}\text{Pb}$	209,9842	-	$\alpha, \beta, \gamma$	1,769	1647	7,8
$^{210}_{83}\text{Bi}$	209,9834	-	$\alpha, \beta, \gamma$	1,769	1647	7,8
$^{210}_{84}\text{Po}$	209,9829	-	$\alpha, \gamma$	1,768	1647	7,8
$^{226}_{88}\text{Ra}$	226,0254		$\alpha, \gamma$	1,859	1732	7,7
$^{230}_{90}\text{Th}$	230,0331		$\alpha, \gamma$	1,887	1757	7,6
$^{235}_{92}\text{U}$	235,0439	0,72	$\alpha, \gamma$	1,918	1785	7,6
$^{238}_{92}\text{U}$	238,0508	99,27	$\alpha, \gamma$	1,937	1803	7,6
$^{243}_{95}\text{Am}$	243,0614	-	$\alpha, \gamma$	1,967	1731	7,5

### 3.3 DEFAUT DE MASSE

La différence entre la masse de l'atome et la somme des masses des nucléons et des masses des électrons reste la même si on se limite aux noyaux des atomes

$$\text{Masse}_{\text{des noyaux des atomes}} < \text{Masse}_{\text{des nucléons séparés}}$$

La différence entre ces 2 masses est appelée : **défaut de masse  $\Delta M$**

$$\Delta M = \text{Masse}_{\text{des nucléons séparés}} - \text{Masse}_{\text{des noyaux des atomes}}$$

Exemple pour l'hélium  $^4_2\text{He}$  :  $\Delta M = (4.0330 - 4.0026) \text{ uma} = 0.0304 \text{ uma}$

### 3.4 LIBERATION D'ENERGIE NUCLEAIRE

#### 3.4.1 Relation d'Einstein : Equivalence [masse – énergie]

On sait que la masse d'un noyau formé est toujours plus petite que la masse de ses constituants. Pour expliquer ce fait, Einstein émit l'hypothèse que « la masse c'est de l'énergie ». Ainsi, pour lui, « à tout corps de masse  $M$  correspond une énergie  $E$  telle que :

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

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

***La masse est une forme d'énergie***

Ainsi un corps de masse 1 kg possède une énergie de  $9 \cdot 10^{16} J$  ce qui est énorme

#### 3.4.2 Énergie et défaut de masse

La relation d'Einstein signifie aussi que :

- lorsqu'un système **reçoit** de l'énergie, sa masse **augmente** d'une quantité telle que

$$\Delta m = \frac{\text{Énergie échangée}}{c^2} = \frac{E_{\text{finale}} - E_{\text{initiale}}}{c^2}$$

- inversement, lorsqu'un système **cède** de l'énergie, sa masse **diminue** d'une quantité telle que :

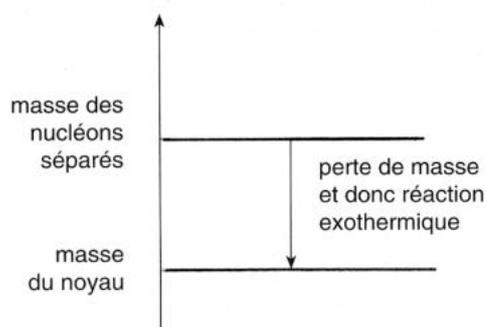
$$\Delta m = \frac{\text{Énergie échangée}}{c^2} = \frac{E_{\text{initiale}} - E_{\text{finale}}}{c^2}$$

#### 3.4.3 Énergie 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.*



$$E_L = \Delta M \cdot c^2$$

Exemple pour l'hélium :  ${}^4_2\text{He}$ . Le défaut de masse = 0.3304 uma

$$E_L = \Delta M \cdot c^2 = 0,3304 \text{ uma} \times 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg / uma} \times (3 \cdot 10^8 \text{ m / s})^2 = 4,54 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

#### Autre unité d'énergie utilisée en nucléaire

On a vu que l'énergie acquise par une charge électrique  $q$  sous une différence de potentielle  $U$  est donnée par la formule :  $E(J) = q(C) \times U(V)$

L'énergie acquise par un électron ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) sous une ddp de 1V est appelée électron-volt (eV)

$$L'énergie de 1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad \boxed{1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}$$

Exemple pour l'hélium  ${}^4_2\text{He}$  :  $E_L = 4,54 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 28,3 \cdot 10^6 \text{ eV} = 28,3 \text{ MeV}$

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 (voir tableau)

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

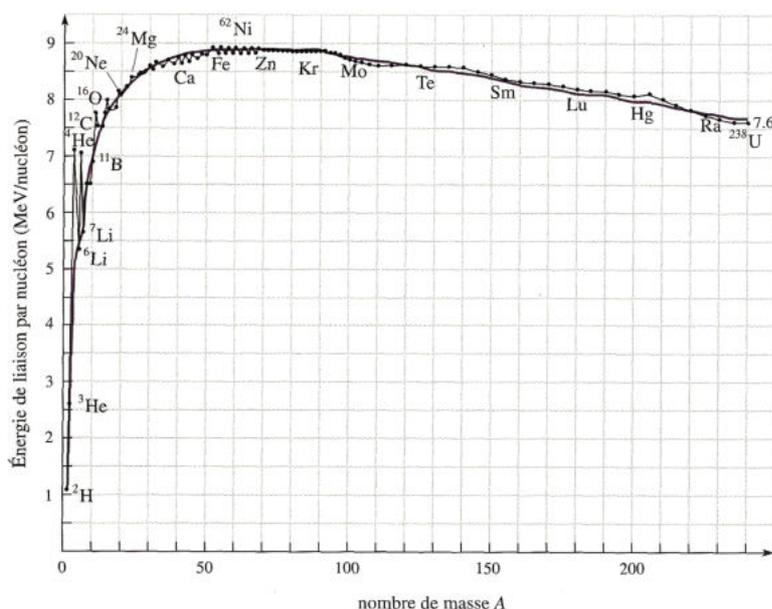
### 3.4.4 Énergie de liaison par nucléon

Plus le noyau contient de nucléons, plus l'énergie de liaison  $E_L$  est grande.

Cependant, si on désire comparer les noyaux entre eux, il faut définir l'énergie moyenne de liaison ou l'énergie de liaison par nucléon

$$E_{L \text{ nucléon}} = \frac{E_L}{A} \quad \begin{array}{l} E_{L \text{ nucléon}} \text{ Énergie de liaison par nucléon} \\ E_L \text{ Énergie de liaison pour l'atome} \\ A \text{ Nombre de nucléon} \end{array}$$

Exemple pour l'hélium  ${}^4_2\text{He}$  :  $E_L \text{ par nucléon} = 28,4 \text{ MeV} / 4 = 7,1 \text{ MeV}$



☞ Plus l'énergie par nucléon est grande, plus l'énergie à fournir pour libérer un nucléon du noyau est importante.

En d'autres termes, plus le noyau est stable.

Ce graphique montre que la plupart des noyaux ont une  $E_L/A$  de l'ordre de 8 MeV avec quelques exceptions pour les atomes légers.

Pour les atomes plus lourds,  $E_L/A$  diminue ce qui montre que les atomes lourds sont des atomes moins stables.

### 3.5 INTERACTION FORTE OU FORCE NUCLEAIRE

Pour séparer les nucléons d'un noyau, il faut lui fournir une énergie considérable. Il faut donc supposer l'existence d'une force d'attraction très intense entre ces nucléons. Cette force, appelée force nucléaire forte, assure la cohésion, la stabilité du noyau.

#### Caractéristiques de la force nucléaire forte

- Cette force nucléaire est beaucoup plus intense que la force de répulsion électrique qui s'exerce entre les protons du noyau. De plus, elle est encore beaucoup plus intense que la force de gravitation entre les nucléons. Pour cette raison, cette force nucléaire est habituellement appelée interaction forte.
- Cette force nucléaire s'exerce entre **tous** les nucléons: aussi bien entre proton et proton, qu'entre proton et neutron ou neutron et neutron.
- Cette force nucléaire ne s'exerce qu'à **très courte distance**: elle devient insignifiante dès que la distance entre nucléons dépasse environ  $2 \text{ à } 3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ . (Le diamètre du noyau est de l'ordre de  $10^{-15} \text{ m}$ , celui de l'atome de l'ordre de  $10^{-10} \text{ m}$ ).

### 3.6 FISSION ET FUSION NUCLEAIRES

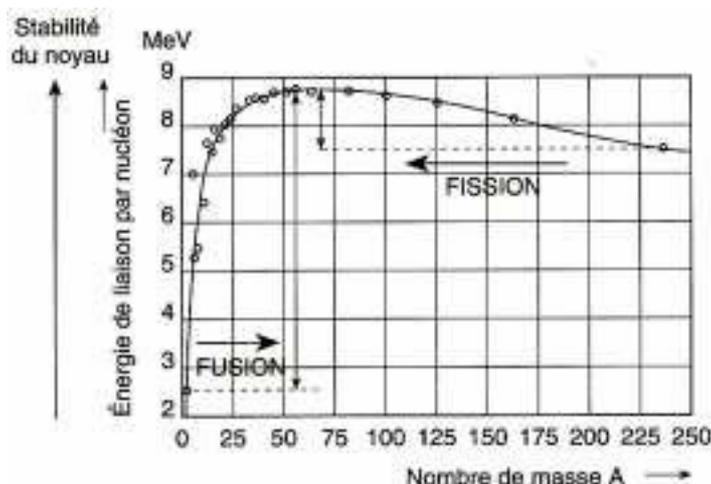
L'énergie de liaison par nucléon n'a pas la même valeur dans tous les noyaux. Ce fait, que nous avons vu au chapitre précédent, est à l'origine de procédés nouveaux pour obtenir de l'énergie.

#### 3.6.1 Principe d'obtention d'énergie

Une réaction nucléaire est un réarrangement des nucléons contenus dans le(s) noyau(x) de réactifs pour former un ou plusieurs noyau(x) nouveau(x).

Au cours de ce processus,

- d'une part les nucléons contenus dans le(s) noyau(x) de réactifs se séparent, ce qui **demande** de l'énergie pour

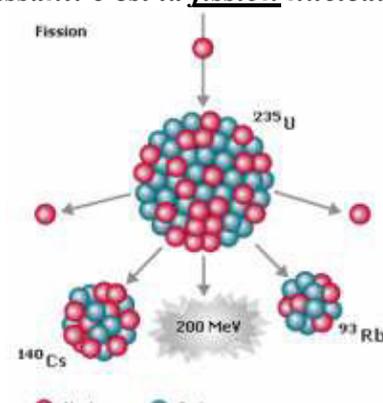
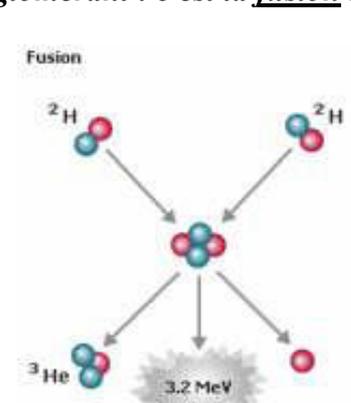


- casser les liaisons;
- d'autre part, ces nucléons se regroupent pour former le(s) noyau(x) résultant(s), ce qui libère de l'énergie, puisque des liaisons se forment.

*Si l'énergie de liaison par nucléon est plus forte dans le(s) noyau(x) ancien(s), alors le processus libère de l'énergie.*

*Or c'est dans les noyaux de masse moyenne que l'énergie de liaison est la plus forte.*

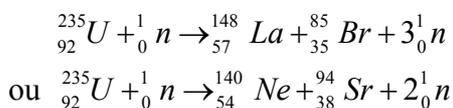
*Pour libérer de l'énergie nucléaire, on peut donc par exemple :*

<ul style="list-style-type: none"> <li><i>former des noyaux de masse moyenne à partir d'un noyau lourd, en le cassant: c'est la <u>fission nucléaire</u></i></li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>former un noyau de masse moyenne à partir de noyaux légers, en les agglomérant : c'est la <u>fusion nucléaire</u></i></li> </ul> 
--	--

## 3.6.2 La fission

### 3.6.2.1 Principe

Un noyau d'uranium 235 appelé noyau fissile est frappé par un neutron. Il peut se casser en deux noyaux appelés produits de fission et libérer 2 ou 3 neutrons. Plusieurs réactions sont observées. En voici 2 à titre d'exemples

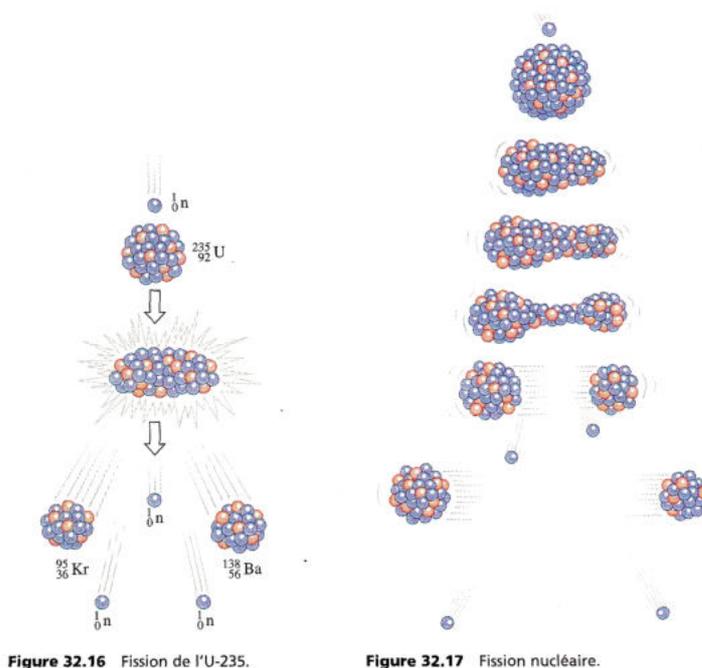


Remarques

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

2. L'énergie libérée par un processus de fission est énorme. Un bilan énergétique montre qu'une fission d'un noyau libère 200 MeV

Autrement dit si tous les noyaux d'une mole d'U235 subissaient la fission, on libérerait une énergie de plus de 19000 milliards de joules.

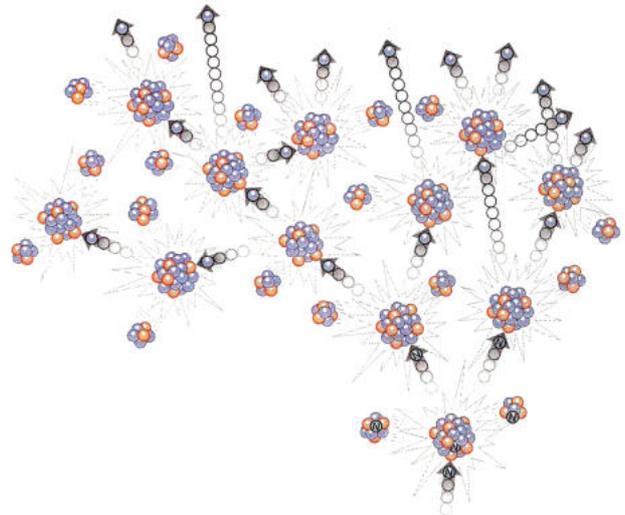


☝ *Si tous les noyaux d'un gramme d'U235 subissaient la fission, on aurait 80 milliards de joules soit autant d'énergie que la combustion complète de 2,5 tonnes de charbon.*

### 3.6.2.2 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).*



### 3.6.2.3 Enrichissement de l'uranium

Dans la nature, il n'y a que 0,7% d' U235 pour 99,3% d' U238.

Or, pour assurer le bon fonctionnement des réacteurs, la proportion d'U235 doit être de 3%. Il est donc nécessaire d'« enrichir » l'uranium naturel.

Parmi les différents procédés existants, nous ne décrivons que la **diffusion gazeuse**, qui est le procédé le plus couramment utilisé.

Le minerai, qui est un oxyde d'uranium, est transformé par réaction chimique en hexafluorure (UF<sub>6</sub>)' Ce choix tient au fait que le fluor n'a qu'un seul isotope naturel; les molécules UF<sub>6</sub> ont donc des masses différentes uniquement à cause des deux isotopes de l'uranium.

L'hexafluorure, qui est très corrosif, est envoyé à l'état gazeux dans un récipient cylindrique inoxydable appelé diffuseur. Une membrane très fine sépare le diffuseur en deux parties maintenues à des pressions différentes; le gaz diffuse donc à travers la membrane de la haute vers la basse pression. Mais à cause de la différence de masse, les molécules contenant l' U235, plus légères que les autres, traversent plus rapidement la membrane; on obtient ainsi, dans la partie basse pression, un gaz enrichi en U235.

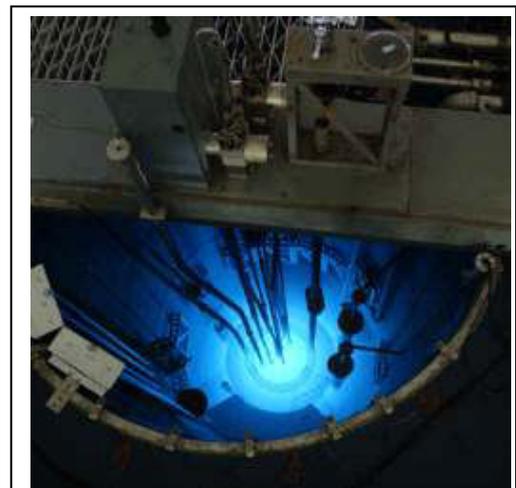
Il faut recommencer l'opération plus de 1 000 fois pour obtenir l'enrichissement souhaité.

### 3.6.2.4 Réacteur à uranium 235

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

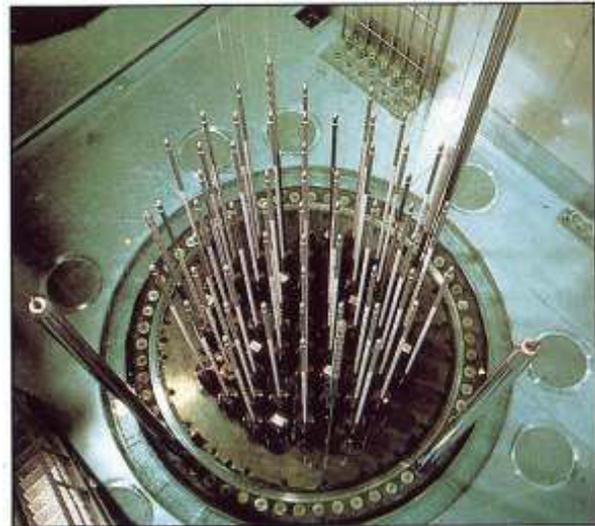
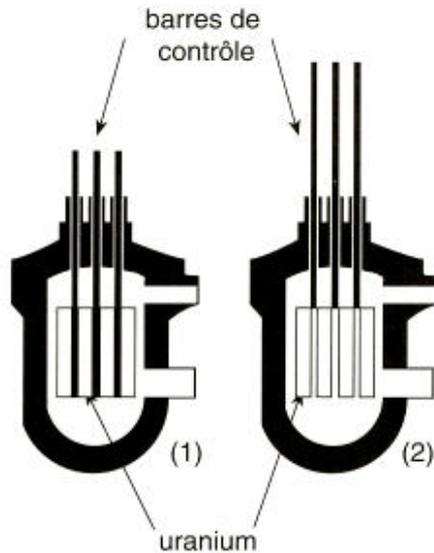
- L'usage pacifique de ce phénomène nécessite le **contrôle** de la réaction en chaîne: il faut faire en sorte qu'en moyenne, **un seul** des deux ou trois neutrons produits par chaque fission de la chaîne, provoque une nouvelle fission.

Il faut donc « éliminer » les neutrons excédentaires; c'est



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

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.

*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*

- Il existe plusieurs types de réacteurs.

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).

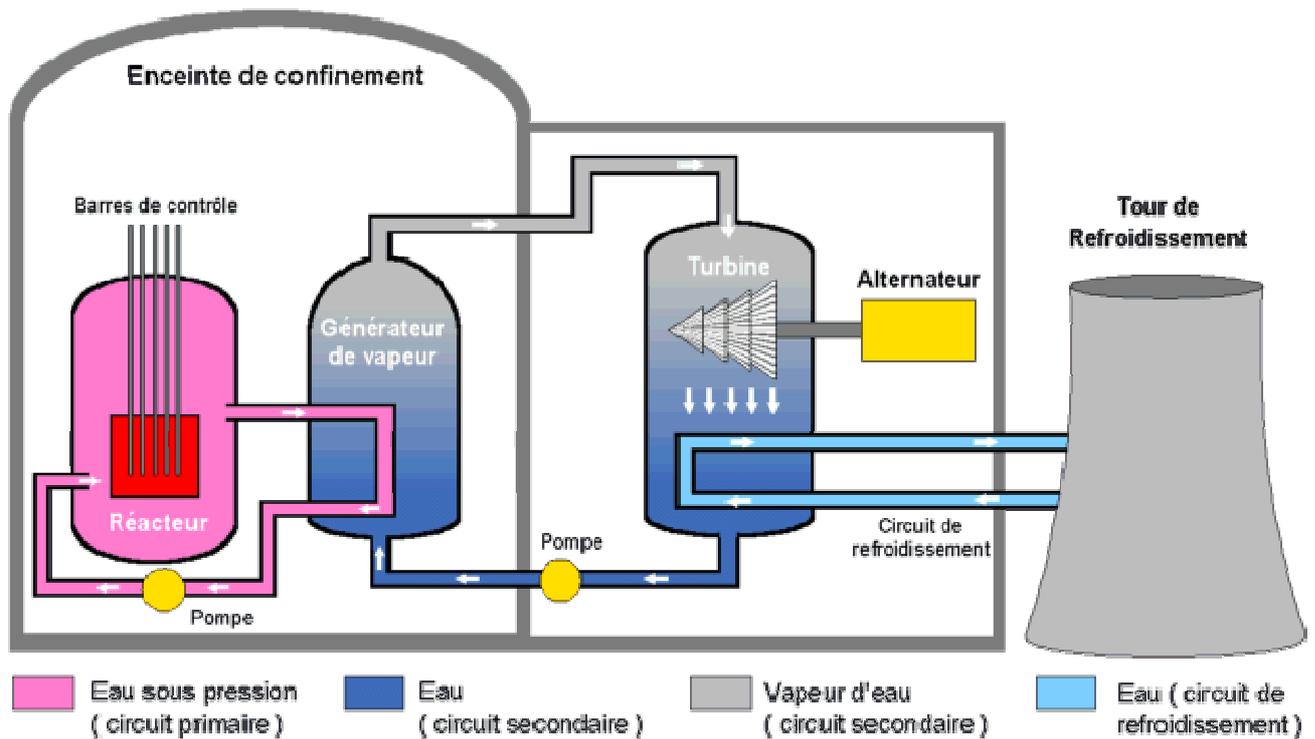
Cette eau dans laquelle plongent les tubes de combustible est à la fois le fluide caloporteur et le modérateur.

- Cette eau, devenue radioactive, ne peut être utilisée directement pour faire fonctionner la turbine. Elle circule en circuit fermé (**circuit primaire**) et va céder sa chaleur à l'eau du **circuit secondaire**, dans le **générateur de vapeur**.

*La vapeur qui y est produite va faire fonctionner la turbine qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique. Cette dernière est transformée en énergie électrique dans l'alternateur.*

*Le circuit d'eau de refroidissement, comme dans une centrale thermique, sert à refroidir et condenser la vapeur sortant de la turbine, afin d'améliorer le rendement de la*

*transformation de chaleur en travail comme cela a été vu l'an dernier.*



Centrale nucléaire de Tihange

### 3.6.2.5 Inconvénients et avantages des centrales nucléaires

L'énergie nucléaire fait l'objet de débats dans nos sociétés. Nous ne prétendons pas trancher ce débat, mais seulement apporter des informations.

#### Situation en Belgique

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.

### Inconvénients

- En fonctionnement normal, le danger provient des quantités énormes de substances radioactives contenues dans le cœur:

- le combustible (70 tonnes)
- les produits de fission tous radioactifs, certains ayant une demi-vie très longue
- beaucoup de noyaux (de l'eau, des tubes en acier, de la cuve, du circuit primaire,...), irradiés par les neutrons, devenus radioactifs.

Pour empêcher la sortie de matières radioactives, le cœur et le circuit primaire se trouvent dans une double enceinte de confinement en béton.

- Parmi les **accidents** possibles, le plus grave serait la rupture du circuit primaire, car le cœur ne serait plus refroidi; même si les barres de contrôle arrêtaient tout de suite les réactions de fission, la température du cœur s'élèverait très fort (parce que les produits de fission, étant radioactifs, libèrent de la chaleur), les tubes contenant le combustible fondraient, la cuve elle-même fondrait.

Les parades consistent à prévoir:

- plusieurs circuits primaires
- des circuits de refroidissement d'urgence.

- Mentionnons aussi les 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!

- Enfin, il y a le 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.

### Traitement des déchets

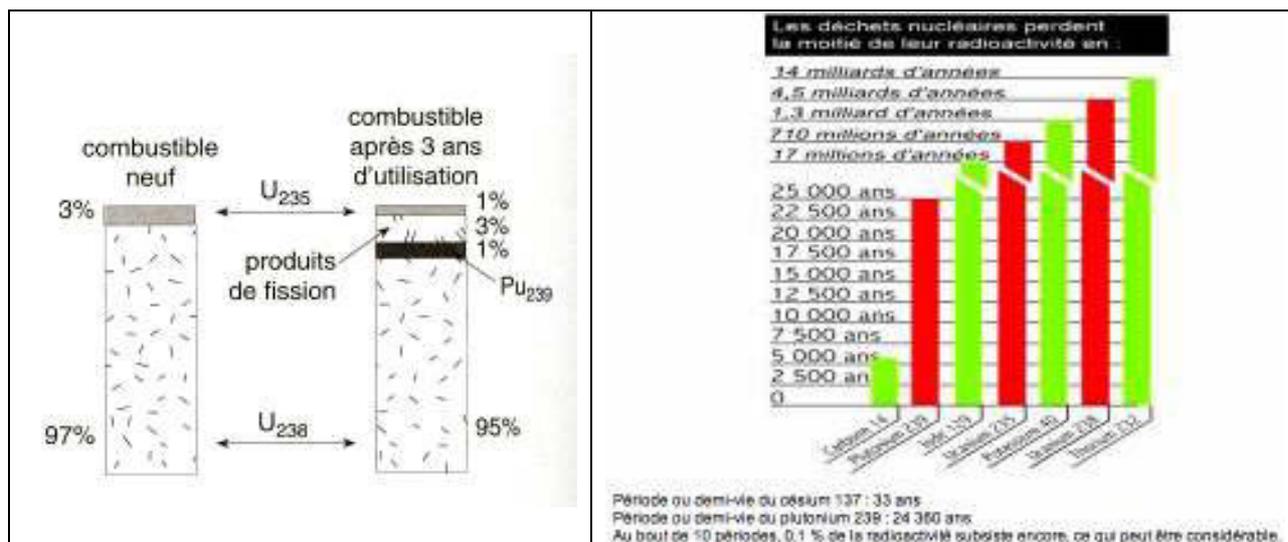
***Le combustible reste environ trois ans dans le réacteur*** (un tiers est renouvelé chaque année). Tout au long de ce séjour, il fournit de l'énergie et subit des transformations :

- diminution de matière fissile, transformée en produits de fission- formation de plutonium, suite à l'absorption d'un neutron par l'uranium 238

Le retraitement consiste à séparer:

- l'uranium restant, et le plutonium formé: ils sont réutilisables pour des réacteurs ou des usages militaires
- les produits de fission qui n'ont aucune utilité, mais sont tous radioactifs.

Après différents traitements chimiques, les produits de fission sont stockés sous forme liquide, et réfrigérés par une circulation d'eau afin d'évacuer la chaleur dégagée par leur caractère radioactif. Après plusieurs années, ils sont coulés dans du verre et ensuite enfouis dans des puits souterrains où ils seront stockés pendant des siècles.



**Les déchets représentent de loin le problème le plus important, pour lequel il n'existe aujourd'hui aucune solution vraiment valable.**

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

### Avantages

- 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/
- Le prix de revient du kWh nucléaire est inférieur à celui du kWh classique.
- 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.
- 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!

## Comparaison des quantités de déchets produits par une centrale nucléaire et une centrale au charbon

Les réserves mondiales de charbon sont suffisantes pour produire l'électricité dans les 100 années à venir. Mais il faut s'attendre qu'une grande partie du charbon soit en fait converti en fuel liquide pour pallier la disparition du pétrole.

Comparons les quantités de déchets produits par une unité de **1000 MW**, travaillant à 33% de rendement. Pour être complet, il faudrait également tenir compte des pollutions générées par les activités minières proprement dites.

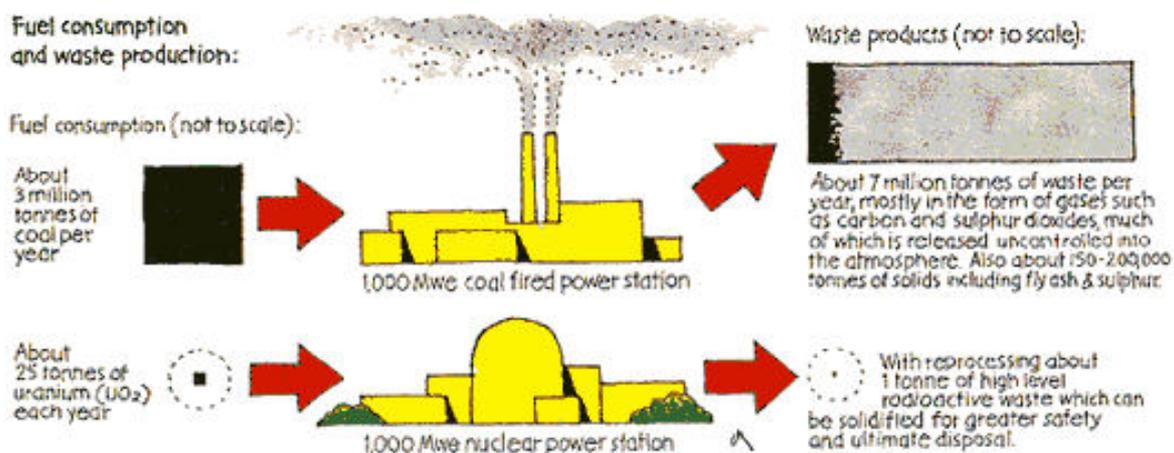
Fuels	Pouvoir calorifique (MJ/kg)
Bois	16
Lignite	9
Charbon de basse qualité	13-20
Charbon	24-30
Gaz naturel	39
Pétrole	45-46
Uranium	500 000

### Unité classique

- 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> enrichit 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.



Les pro-nucléaires mettent en exergues que les déchets générées par les centrale au fuel fossile ne sont pas contrôlés. Par exemple, les pluies acides d'origine allemande ont dévasté les forêts scandinave ou encore au Canada avec les pluies acides d'origine américaine. Alors que les déchets d'origine nucléaire sont confinés et contrôlés. Les anti-nucléaires contestent ce point de vue.

De même les pro-nucléaires mettent en évidence que les centrales classiques génèrent 7 milliards de tons de CO<sub>2</sub> par an. Les centrales nucléaires permettent d'éviter le dégagement de 2.4 milliards de tons supplémentaires. En Belgique, les centrales nucléaires économisent 15 millions de tons de CO<sub>2</sub>, ce qui est loin d'être négligeable dans un petit qui peine à respecter les accords de Kyoto.

### 3.6.3 La fusion nucléaire

#### 3.6.3.1 Principe

*C'est une réaction au cours de laquelle deux noyaux légers fusionnent pour former un noyau plus lourd.*

**Exemple :**  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$

${}^2_1\text{H}$  est l'hydrogène «lourd» ou deutérium (1p, 1n); il existe dans la nature: 0,015 % de l'hydrogène des océans est du deutérium.

${}^3_1\text{H}$  est l'hydrogène « super-lourd» ou tritium (1 p, 2n); il n'existe pas dans la nature, il faut le fabriquer artificiellement. Il est radioactif.

Cette réaction de fusion libère 17,6 MeV par noyau d'hélium formé.

*♣ 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.*

#### 2.6.3.2 Difficulté et solutions

*Pour que la fusion puisse avoir lieu, il faut que les deux noyaux légers se rencontrent. Or ils portent une charge électrique de même signe (+): ils se repoussent donc. Comment provoquer leur rencontre?*

a) Des réactions de fusion ont lieu dans les **étoiles**: grâce à leur température interne très élevée (supérieure à 10 millions de degrés C) l'agitation thermique est suffisante pour que les noyaux se rencontrent malgré la répulsion coulombienne.

Ce sont ces réactions de fusion qui produisent, à partir de l'hydrogène primitif, de l'hélium, du carbone, de l'oxygène,...



b) En **laboratoire**, on peut accélérer des noyaux de deutérium et les projeter sur une cible contenant des noyaux de tritium.

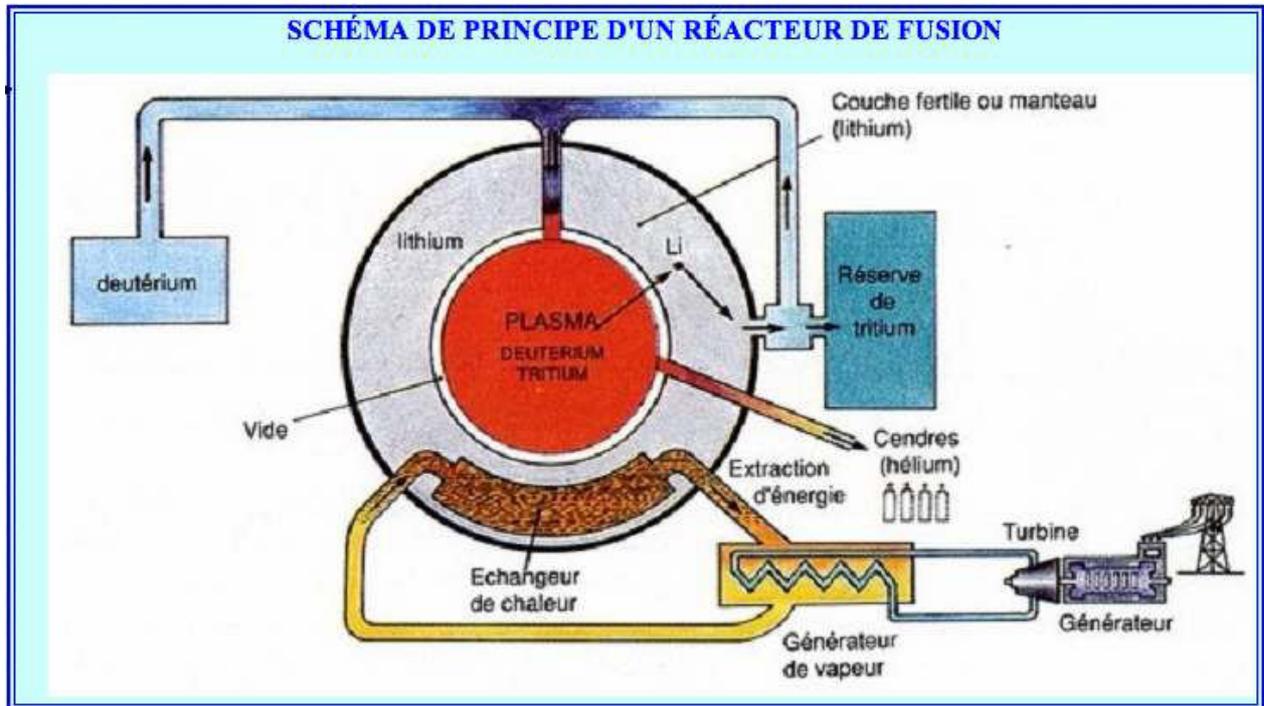
On peut ainsi étudier cette réaction, mais économiquement cette méthode n'est pas intéressante pour la production d'énergie.

c) Dans la **bombe H** (comme hydrogène), la réaction de fusion a lieu, comme dans les étoiles, grâce à une température très élevée, obtenue au moyen d'une bombe A servant d'"allumette".

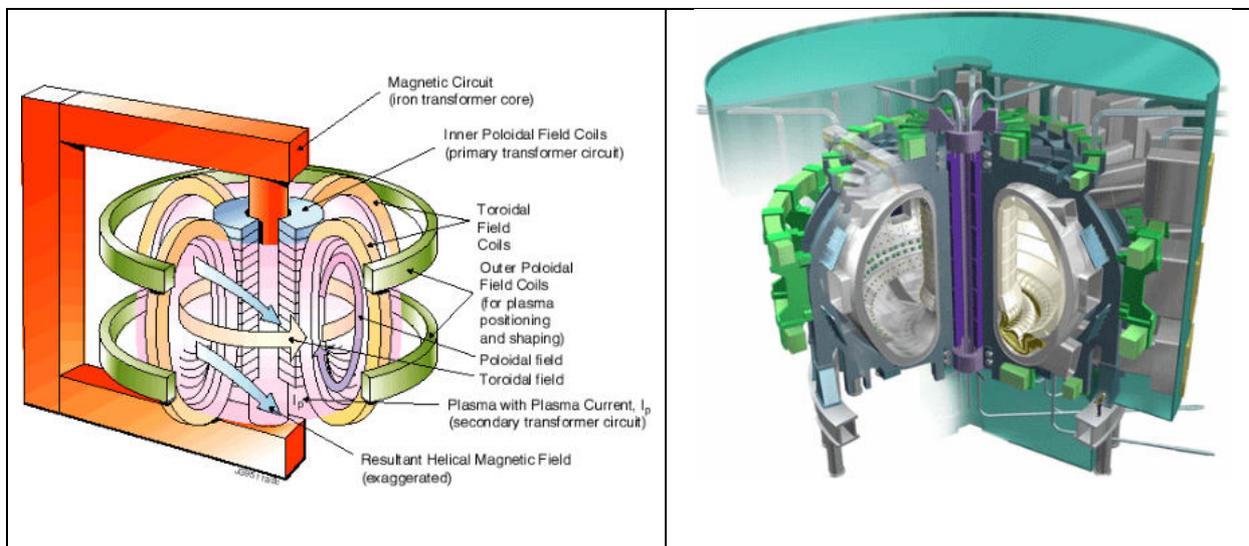
d) Il n'existe pas encore de **réacteur** (mais les choses pourraient changer rapidement) maîtrisant la fusion nucléaire pour utiliser pacifiquement cette énergie. Il faudrait arriver à ce que:

- un mélange de deutérium et de tritium ayant une concentration suffisante
- soit maintenu à une température de 100 millions de degrés C
- pendant une durée suffisamment longue (au moins 10 minutes).

Il faudra peut-être encore plus de vingt ans pour voir ces problèmes résolus, et disposer alors d'une réserve d'énergie colossale.



## Qu'est-ce qu'un tokamak ?



**Iter** sera le plus grand tokamak du monde. Un tokamak est une installation capable de produire les conditions nécessaires pour obtenir une énergie de fusion.

Une étoile commence à briller quand la matière en son sein est capable de déclencher des réactions de fusion, libérant de grande quantité d'énergie, sous l'effet de forces de gravitation, de densités et de températures suffisantes. Dans une étoile, la tendance du plasma à se disperser et à se refroidir est contrebalancée par la gravitation. 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.

Mettant à profit les propriétés du plasma (le plasma est un gaz ionisé qui conduit l'électricité), les chercheurs ont très vite pensé à maintenir le plasma dans une « boîte immatérielle ». Les particules ayant la propriété de s'enrouler autour des lignes de champ magnétique, ils ont compris qu'il fallait les agencer afin qu'elles les suivent lorsqu'elles étaient en mouvement. En refermant les lignes de champ magnétique sur elles-mêmes, ils sont parvenus à mettre au point le concept du tokamak, une installation en forme de tore.

Les scientifiques russes sont parvenus en 1968 à porter un plasma d'hydrogène à une température de l'ordre de 10 millions de degrés, jamais atteinte jusqu'alors. Ce sont les inventeurs du tokamak, acronyme russe de Toroidalnaya Kamera c Magnitnymi Katushkami. L'intérêt de ce concept pour produire des plasmas ne s'est pas démenti depuis, puisque les principales installations construites dans le monde furent des tokamaks : TFTR aux Etats-Unis, JT60 au Japon, JET en Angleterre et Tore Supra, en France, sur le centre du CEA à Cadarache et maintenant le projet international ITER.

## Lecture

### L'ARME NUCLÉAIRE



"Le rayonnement d'un million de Soleils  
Éclatant d'un seul coup dans le ciel.  
Ainsi serait la splendeur du Tout-Puissant  
Je suis devenu la mort,  
Le destructeur de l'Univers."

Ainsi fut la pensée instinctive d'Oppenheimer lors de la première explosion. Ce sont des paroles de Krishna dans le *Mahabharata* (un des livres sacrés de la tradition hindouiste). Il disait que ça lui rappelait le sentiment de piété profonde qu'il éprouvait.

Sans souhaiter faire d'amalgame, nous considérons qu'il est indispensable, à l'époque où l'arme nucléaire sert de moyen de dissuasion et donc d'élément de stabilité planétaire, à la culture générale du physicien de connaître certaines propriétés élémentaires de la bombe atomique à fission. Nous allons donc exceptionnellement dans ce petit sous-chapitre sans mathématiques (celles de l'arme nucléaire et des centrales nucléaires seront vues lors de notre étude de la neutronique) parler un petit peu de cette arme de destruction massive qui fascine souvent les étudiants des salles de cours.

Certes, nous étudierons plus tard théoriquement, comment provoquer une réaction en chaîne divergente dans un volume donné. Cependant, il ne faudra évidemment pas s'attendre à acquérir les connaissances nécessaires à la fabrication d'une telle arme puisque cela ne fait pas appel uniquement à des connaissances de la physique, mais également à de l'électronique, mécanique, chimie, mathématiques, etc.

S'agissant d'une explosion, l'usage s'est immédiatement introduit de comparer l'énergie d'une arme nucléaire à celle d'un explosif courant: le Trinitrotoluène (T.N.T). Ce T.N.T fournit 4'200'000 Joules par Kilo, mais les énergies des armes nucléaires sont telles qu'il est plus parlant de les évaluer en milliers de tonnes - ou kilotonnes de T.N.T (ultérieurement les armes thermonucléaires représentèrent un nouveau bond dans les énergies explosives: l'unité pratique de comparaison est le million de tonnes - Mégatonne de T.N.T).

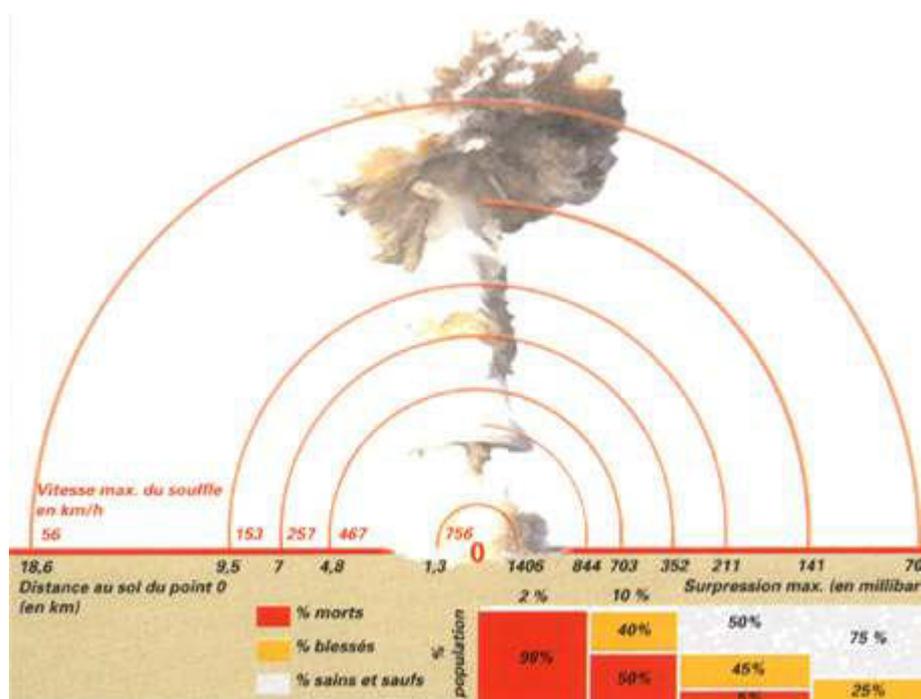
La fission de 56 grammes d'Uranium 235 ou de Plutonium 239 donne l'équivalent de 1 Kilotonne avec la fission de  $145^{21}$  atomes (ce n'est même pas une valeur entière du nombre d'Avogadro!!).

La première explosion nucléaire expérimentale, à Alamogordo le 16 juillet 1945 - fut évaluée à 20 KT, avec une bonne précision car il avait été possible de mettre en place de multiples dispositifs de mesure.

Celles du 6 août, sur Hiroshima (à Uranium 235) puis du 9 août sur Nagasaki (au Plutonium 239) furent d'abord estimées aussi à 20 Kt. Ultérieurement, et par étude fine sur les effets de souffle, leurs énergies furent

respectivement ramenées à environ 17 et respectivement 15 Kt. Cela n'en représentait pas moins l'équivalent d'un chargement en T.N.T. d'un convoi de l'ordre de 6000 camions de l'US Army.

Voici un schéma à la fois intéressant et persuasif des effets d'une bombe atomique (pour information à partir d'une vitesse de 220 [km/h] un être humain moyen est soulevé du sol) :



(1)

Donc en d'autres termes voici en résumé et en approximations les effets d'une arme à fission de 1 Mt explosant à 2450 mètres d'altitude (tout en sachant qu'aujourd'hui les américains et les russes ont des armes nucléaires à fusion dont la puissance de feu dépasse les 50 Mégatonnes...):

Jusqu'à 1.3 [km], tout est rasé, même les bâtiments en béton armé. Jusqu'à 4.8 [km], la plupart des usines et des bâtiments commerciaux sont détruits; les habitations faites de briques et de bois sont anéanties, et leurs débris éparpillés. Jusqu'à 7 [km], les ensembles commerciaux de structure légère et les résidences privées sont démolis. Les constructions plus lourdes sont sérieusement endommagées. Jusqu'à 9.5 [km], les murs des bâtiments légers sont renversés, les résidences privées gravement détériorées. Le souffle (ou surpression) est encore assez puissant pour tuer les personnes qui se trouvent à l'extérieur (explosion des poumons). Jusqu'à 18.6 [km], différents édifices sont endommagés, les rues sont jonchées de débris de vitres et de tuiles. 10 à 20 minutes après la déflagration, les débris aspirés dans la dépression de la tige du champignon atomique, retombent au sol. Suivent 1 à 2 heures après, les débris se situant dans le champignon (sa tête).

La plupart des effets représentés sur le schéma ne sont pas proportionnels à l'énergie. Il n'y a donc pas lieu de faire une simple multiplication pour une arme de 30'000 mégatonnes!