

Thème 1 : Constitution et transformation de la matière

Chapitre 5 : Transformations physiques et nucléaires

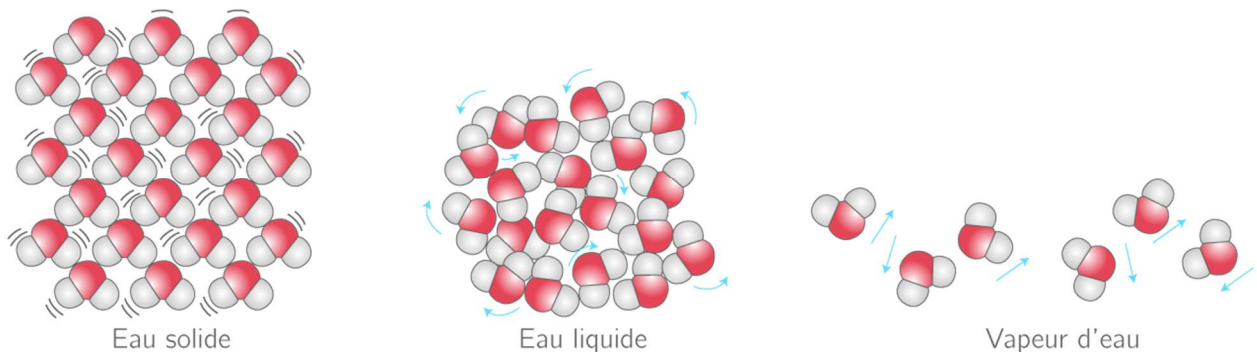
I - Transformations physiques

1) Les états de la matière

L'état solide est caractérisé par des molécules ou des ions en contact et liés les uns avec les autres, dans un empilement régulier (cristal), et en vibration constante autour d'une position d'équilibre.

L'état liquide est caractérisé par des molécules ou des ions en contact les uns avec les autres et en mouvement constant.

L'état gazeux est caractérisé par des molécules ou des ions qui sont « très éloignés » les uns des autres, c'est-à-dire que la distance les séparant est très supérieure à leur taille. Les molécules ou les ions sont en mouvement constant.



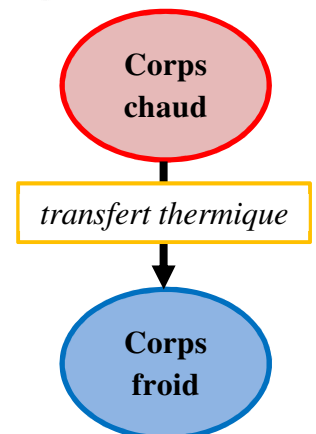
2) Transferts thermiques

a) Qu'est-ce qu'un transfert thermique ?

Lorsque deux corps à des températures différentes sont mis en contact, ils échangent de l'énergie : on parle de **transfert thermique**.

Le corps le plus froid reçoit de l'énergie de la part du corps le plus chaud.

Le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid.



b) Transfert thermique et variation de température

Les molécules ou ions empilés dans un état solide ne sont pas rigoureusement immobiles. Ils sont animés d'un mouvement de vibration, appelée agitation thermique.

L'énergie thermique, sous forme de chaleur, que reçoit un corps est convertie en énergie cinétique. L'agitation des molécules croît et la température s'élève.

Une élévation de la température est liée à une augmentation de l'agitation thermique des molécules ou des ions.

Lorsqu'un corps pur reçoit un transfert thermique sous forme de chaleur, cela se traduit :

- à l'échelle macroscopique par une élévation de la température ;
- à l'échelle microscopique par une augmentation de l'agitation des particules.

Etat	Effet d'un transfert thermique reçu
Solide	Augmentation du mouvement de vibration des particules autour de leur position d'équilibre.
Liquide	Augmentation du mouvement désordonné des particules.
Gaz	Augmentation de la vitesse des particules

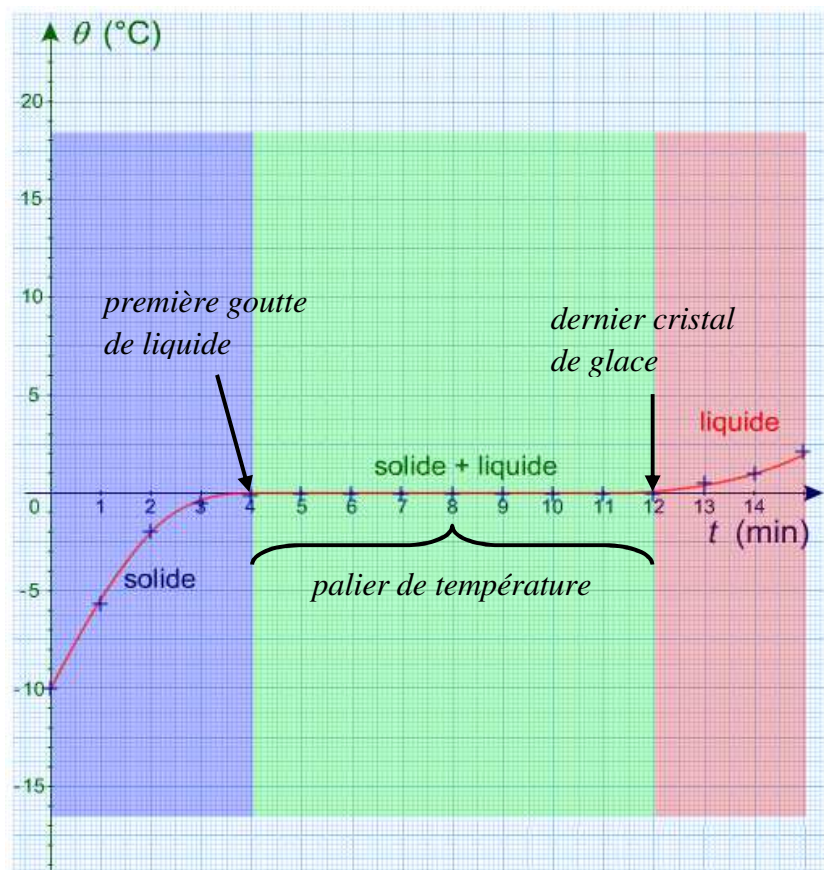
c) Transfert thermique et changement d'état

i) *Changement d'état*

Exemple :

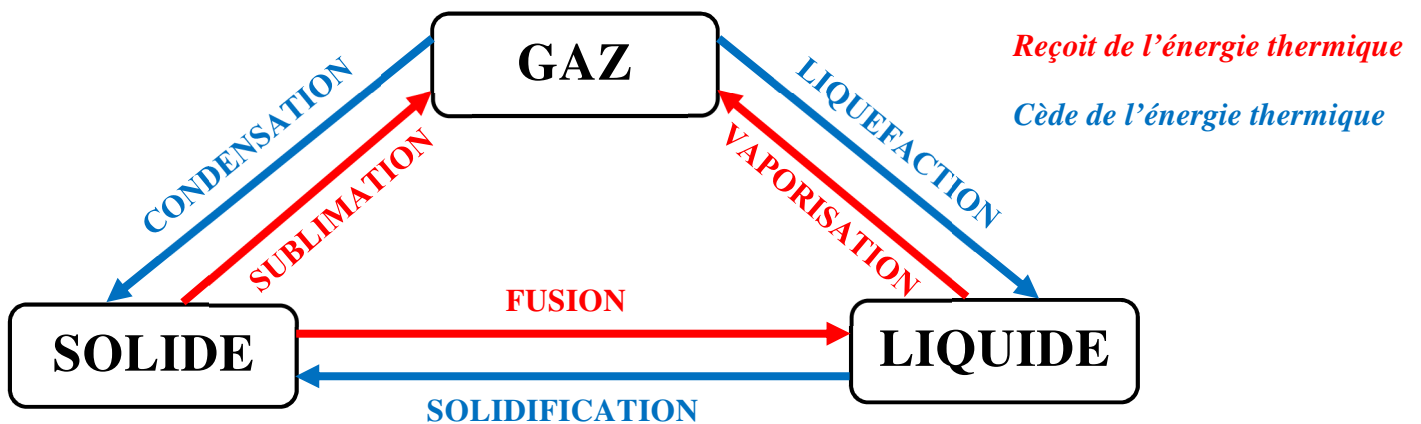
Lorsque l'eau solide (glace) reçoit de l'énergie thermique au cours du temps, on obtient différentes étapes :

- la température de la glace commence par augmenter.
Cela se traduit, à l'échelle microscopique, par une plus forte vibration des molécules d'eau autour de leurs positions d'équilibre : l'agitation thermique des molécules augmente *(en bleu)* ;
- lorsque la température atteint $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, de l'eau liquide apparaît et la température reste constante jusqu'à la fin de la fusion.
L'agitation thermique des molécules d'eau est alors suffisante pour casser les interactions intermoléculaires qui les maintenaient au voisinage de leurs positions d'équilibre *(en vert)* ;
- lorsque l'eau est à l'état liquide, sa température croît de nouveau ; l'agitation thermique des molécules d'eau augmente *(en rose)*.



Sous pression constante, le changement d'état d'une espèce chimique se fait à une température constante.

Ceci se généralise aux six changements d'état d'un corps :



Un corps pur qui reçoit de l'énergie par transfert thermique peut changer d'état : il passe alors à un état moins ordonné.

Remarque 1 :

Il ne faut surtout pas confondre dissolution et fusion : le sel ne fond pas dans l'eau, il s'y dissout.

Une dissolution met en jeu deux corps : un soluté solide et un solvant liquide.

La fusion, elle, met en jeu un seul corps, pur ou non, qui passe de l'état solide à l'état liquide.

Par exemple, le sel solide devient liquide à une température de 800 °C.

Remarque 2 :

A une pression donnée, cette température est caractéristique de l'espèce considérée.

ii) Equation d'un changement d'état

L'équation de changement d'état est l'écriture symbolique, à l'échelle macroscopique, de la transformation physique d'une espèce.

Exemple :

Lorsque l'eau passe de l'état solide à l'état liquide, la fusion peut être modélisée par l'équation : $H_2O_{(s)} \rightarrow H_2O_{(l)}$.

iii) Energie massique de changement d'état

Le transfert thermique Q mis en jeu lors d'un changement d'état est lié à la masse m de l'espèce chimique qui change d'état et à l'énergie massique ou chaleur latente L du changement d'état de l'espèce considérée.

Elle s'exprime en joule par kilogramme ($J \cdot kg^{-1}$).

$$Q = m \times L$$

Q en joules (J)

m en kilogramme (kg)

L en joule par kilogramme $J \cdot kg^{-1}$

Lors de **la fusion**, de **la vaporisation** ou de **la sublimation** d'un corps pur, les interactions attractives entre les entités, responsables de la cohésion, doivent être rompues.

Ces changements d'état nécessitent un **apport d'énergie**.

L'énergie massique de ces changements d'état est donc **positive** : ces transformations physiques sont **endothermiques**.

Exemple :

L'énergie massique de fusion de l'eau est $E_{mass, fus}(eau) = 334 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Afin de faire fondre une masse $m = 200 \text{ g}$ d'eau solide, il faut fournir l'énergie : $E_{fus} = m \times E_{mass, fus}(eau) = 0,200 \times 334 = 66,8 \text{ kJ}$.

Cette transformation physique est endothermique.

Au contraire, lors de **la solidification**, de **la condensation** ou de **la liquéfaction** d'un corps pur, le système **cède de l'énergie**.

L'énergie massique de ces changements d'état est donc **négative** : ces transformations physiques sont **exothermiques**

Exemple :

Afin de faire fondre une masse $m = 200 \text{ g}$ d'eau solide, il faut fournir l'énergie : $E_{fus} = m \times E_{mass, fus}(eau) = 0,200 \times 334 = 66,8 \text{ kJ}$.

Par conséquent, l'énergie correspondante à la solidification d'une masse $m = 200 \text{ g}$ d'eau liquide sera : $E_{sol} = -E_{fus} = -66,8 \text{ kJ}$.

Cette transformation physique est exothermique.

Remarque 1 :

Lors du passage d'un état désordonné à un autre état plus ordonné, l'énergie est égale et opposée au processus inverse : $E_{sol} = -E_{fus}$, $E_{cond} = -E_{sub}$ et $E_{liq} = -E_{vap}$.

Remarque 2 :

Quel que soit la transformation physique d'un corps, il y a conservation de la masse de ce corps. Seul le volume peut être modifié.

3) Récapitulatif

La matière peut se trouver sous trois états : solide, liquide et gaz dont chaque état a des propriétés qui le caractérisent.

Lors d'une fusion, d'une vaporisation ou d'une sublimation, l'espèce chimique change d'état et son énergie augmente, alors que celle du milieu extérieur diminue : la transformation physique est endothermique ($Q > 0$) ; le milieu extérieur se refroidit.

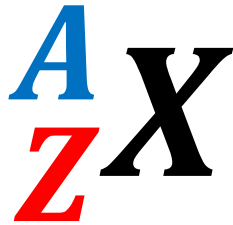
Lors d'une solidification, d'une liquéfaction ou d'une condensation, l'espèce chimique change d'état et son énergie diminue, alors que celle du milieu extérieur augmente : la transformation physique est exothermique ($Q < 0$) ; le milieu extérieur se réchauffe.

II - Transformations nucléaires

1) Le noyau d'un atome

a) La représentation symbolique du noyau

Par convention, le noyau d'un atome est noté tel que :



A est le nombre de nucléons, c'est-à-dire la somme du nombre de protons et du nombre de neutrons.

X est le symbole de l'atome considéré.

Z est le numéro atomique, c'est-à-dire le nombre de protons.

Le nombre de neutrons N d'un atome est donné par la relation :

$$N = A - Z.$$

Exemples :

- l'élément chimique hydrogène H comporte 1 proton et 0 neutron (soit 1 nucléon) dans son noyau. Sa représentation est donc : 1_1H ;
- l'élément chimique oxygène O comporte 8 protons et 8 neutrons (soit 16 nucléons) dans son noyau. Sa représentation est donc : ${}^{16}_8O$.

Remarque 1 :

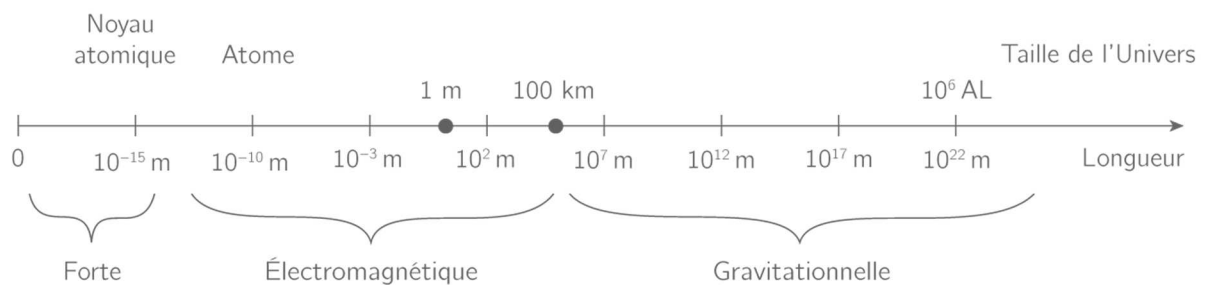
Il n'y a aucun lien entre le nombre de protons et le nombre de neutrons contenu dans un noyau.

Remarque 2 :

Toutes les structures de l'Univers sont régies par des interactions fondamentales :

- l'interaction gravitationnelle qui s'exerce entre les corps massiques ;
- l'interaction électromagnétique qui s'exerce entre les corps électriquement chargés ;
- l'interaction forte qui explique la cohésion du noyau ;
- l'interaction faible qui se manifeste dans certains cas de radioactivité.

Selon l'ordre de grandeur et la taille de l'édifice concerné, l'une des interactions est prédominante :



b) Les isotopes

Des atomes ou des ions qui ont le même numéro atomique Z , mais des nombres de nucléons différents sont appelés isotopes.

Ainsi, les isotopes ont le même nombre de protons, mais des nombres de neutrons différents.

Exemple :

Les 2 atomes de l'élément cuivre ${}^{63}_{29}\text{Cu}$ et ${}^{65}_{29}\text{Cu}$ sont des isotopes car ils ont un numéro atomique identique ($Z = 29$) et des nombres de nucléons A différents ($A = 63$) pour le premier et ($A = 65$).

Remarque 1 :

Deux éléments chimiques qui possèdent le même nombre de nucléons A mais qui ont un nombre de protons différents sont appelés isobares.

Les atomes de carbone 14 (${}^{14}_6\text{C}$) et d'azote (${}^{14}_7\text{N}$) sont des isobares.

Remarque 2 :

Des éléments chimiques qui ont le même nombre de neutrons (N) sont appelés isotones. Autrement dit, ils ont un nombre de nucléons et de protons différents mais un même nombre de neutrons.

Les atomes de carbone 13 (${}^{13}_6\text{C}$) et d'azote (${}^{14}_7\text{N}$) comptent tous deux 7 neutrons, mais un nombre de nucléons et de protons différents.

c) Récapitulatif

Un atome est constitué d'un noyau (protons chargés positivement et neutrons non chargés), entouré d'électrons chargés négativement.

Un atome est électriquement neutre.

Par conséquent, un atome contient autant de protons que d'électrons, Z .

Des noyaux qui appartiennent au même élément chimique mais qui diffèrent par leur nombre de neutrons sont appelés noyaux isotopes.

2) Les réactions nucléaires spontanées

a) Stabilité des noyaux atomiques

i) *La radioactivité*

La cohésion du noyau atomique résulte d'un équilibre entre l'interaction électromagnétique, répulsive entre les protons (charge identique), et l'interaction forte, attractive entre tous les nucléons.

Cependant, un excès de protons par rapport aux neutrons, un excès de neutrons par rapport aux protons ou un excès de protons et de neutrons rendent certains noyaux d'atomes instables.

Parmi les isotopes possibles d'un élément chimique, seuls certains sont stables.

Les autres se désintègrent spontanément en émettant des rayonnements sous forme de particules chargées et, souvent, d'ondes électromagnétiques : ils sont radioactifs.

Exemple :

Pour l'aluminium Al , par les noyaux isotopes existant ${}^{25}_{13}\text{Al}$, ${}^{26}_{13}\text{Al}$, ${}^{27}_{13}\text{Al}$, ${}^{28}_{13}\text{Al}$ et ${}^{29}_{13}\text{Al}$, seul l'isotope ${}^{27}_{13}\text{Al}$ est stable ; les autres étant instables.

On peut remarquer sur le diagramme représentant le nombre de neutrons N en fonction du nombre de protons Z , ou diagramme de Segré, que :

- pour $Z < 20$, les noyaux stables sont ceux qui comportent autant de neutrons que de protons ($N = Z$) ;
- pour $Z > 20$, les noyaux stables comportent plus de neutrons que de protons.

On appelle « vallée de (la) stabilité » l'ensemble des noyaux stables.

Le type de désintégrations que subissent les noyaux instables dépend de leur position par rapport à la vallée de stabilité.

La Terre s'est formée à partir de poussières d'étoiles renfermant des éléments radioactifs.

Elle est par ailleurs constamment soumise à un flux de particules cosmiques de haute énergie, qui engendrent la formation d'éléments radioactifs.

Comme l'ensemble des êtres vivants, l'Homme est donc exposé à une radioactivité naturelle.

La radioactivité naturelle a été mise en évidence par Henri Becquerel (1852 – 1908), puis expliqué par Pierre Curie (1859 – 1906) et Marie Curie (1867 – 1934). Ils ont reçu ensemble le prix Nobel de Physique en 1903 pour cette découverte.

Exemple :

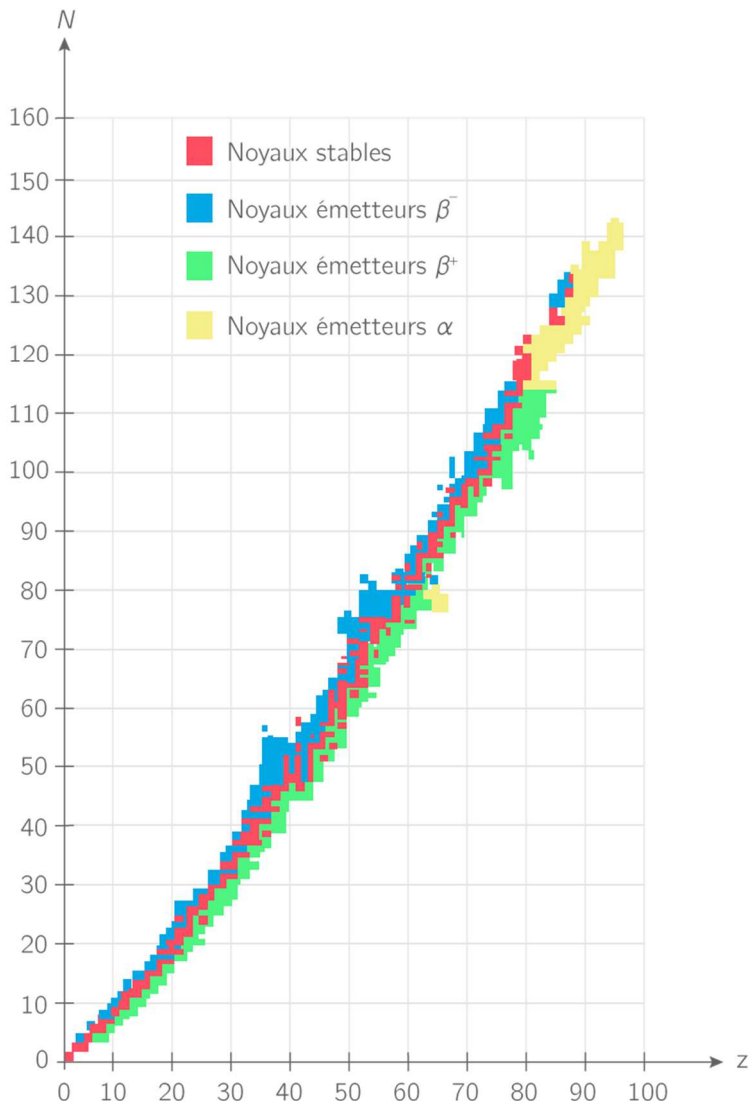
Le carbone 14 est un isotope radioactif du carbone formé en haute atmosphère.

Il se fixe sur les organismes vivants et sa proportion reste constante jusqu'à leur mort.

Elle diminue ensuite progressivement, et sa mesure permet d'accéder à la date du décès.

En 1934, le premier isotope radioactif est créé : la radioactivité artificielle est née.

La possibilité donnée à l'Homme de produire des isotopes radioactifs de tous les éléments dans les accélérateurs de particules trouve des applications dans de nombreux domaines, de la médecine à l'art, en passant par l'agroalimentaire.



L'Homme sait, depuis un siècle, créer des éléments radioactifs par collision de particules dans des accélérateurs : c'est la radioactivité artificielle.

Exemple :

En médecine nucléaire, on injecte des isotopes radioactifs d'atomes non radioactifs présents dans le corps humain.

Ils ont les mêmes propriétés chimiques et se comportent donc de la même manière dans le corps.

Le rayonnement produit par la radioactivité de ces isotopes permet l'imagerie médicale (scintigraphie, TEP (Tomographie par Emissions des Positons)) ou le traitement médical (radiothérapie).

Remarque :

Les noyaux d'un échantillon radioactif ne se désintègrent pas tous simultanément.

L'activité A d'un échantillon est le nombre de désintégration par seconde nous renseigne sur la rapidité de la disparition des noyaux radioactifs. Elle s'exprime en becquerel (Bq) et se mesure à l'aide d'un compteur Geiger-Muller.



ii) **Récapitulatif**

La radioactivité est le phénomène associé à la désintégration spontanée des noyaux instables et s'accompagne de rayonnement.

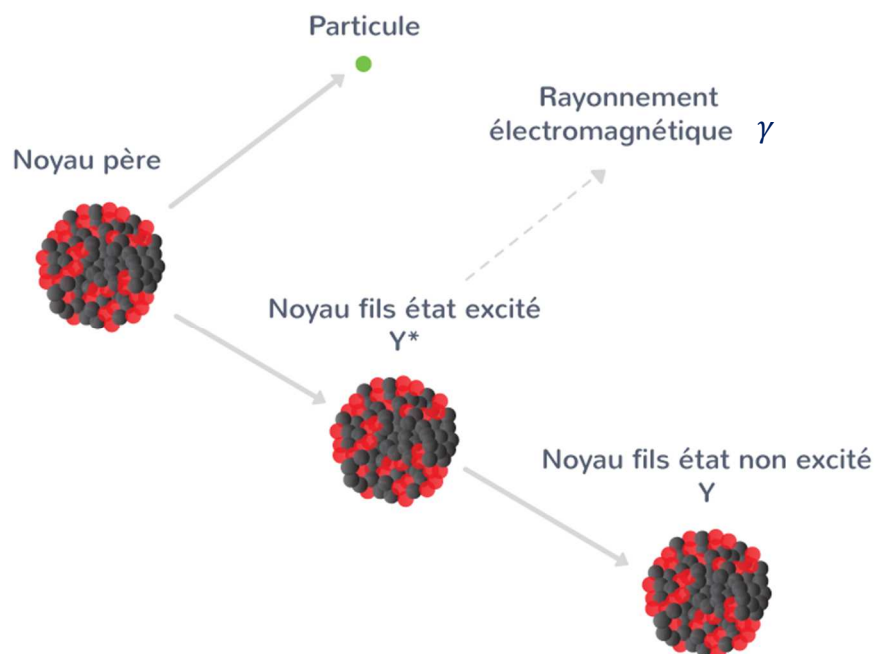
La radioactivité est dite naturelle lorsque les noyaux instables existent dans la nature ; elle est dite artificielle lorsque les noyaux instables sont créés en laboratoire.

b) **Les différents types de désintégration**

i) **Bilan d'une désintégration radioactive**

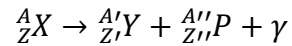
La désintégration radioactive du noyau instable, appelé noyau père et noté A_ZX , s'accompagne de l'émission :

- d'un noyau fils excité ${}^{A'}_{Z'}Y^*$;
- d'une particule ${}^{A''}_{Z''}P$.



Le noyau fils ne restant pas dans un état excité, il se désexcite en émettant un rayonnement électromagnétique γ pour se retrouver dans l'état ${}^A_{Z'}Y$.

Le bilan de la désintégration peut donc s'écrire :



La désintégration radioactive est une réaction nucléaire spontanée au cours de laquelle un noyau radioactif donne naissance à un noyau plus stable.

Remarque :

Le bilan de la désintégration peut également s'écrire : ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A'}_{Z'}Y^* + {}^{A''}_{Z''}P$. Dans ce cas, il faut alors veiller à écrire le noyau fils dans l'état excité.

ii) **Lois de conservation**

Lors d'une désintégration nucléaire, il y a conservation du nombre de charge Z et du nombre de nucléons A appelé aussi nombre de masse.

Pour une désintégration ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A'}_{Z'}Y + {}^{A''}_{Z''}P + \gamma$, les lois de Soddy permettent d'écrire :

- la conservation du nombre de masse : $A = A' + A''$;
- la conservation du nombre de charge : $Z = Z' + Z''$.

La radioactivité est un phénomène :

- **spontanée** : elle se déclenche sans intervention extérieure ;
- **aléatoire** : on ne peut pas prévoir l'instant de la désintégration ;
- **inéluctable** : un noyau instable se désintégrera tôt ou tard ;
- indépendante de la pression et de la température contrairement à bon nombre de réactions chimiques.

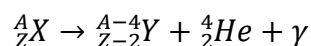
Remarque :

La radioactivité est une réaction dite nucléaire, car elle ne concerne le noyau de l'atome par opposition aux réactions chimiques qui ne concernent que l'atome sans modifier le noyau ; d'où la conservation des éléments chimiques.

iii) **Radioactivité α**

Les noyaux peuvent être instables en raison d'un excédent en nucléons. Ils se désintègrent en émettant un noyau d'hélium 4_2He , appelé particule α .

Le bilan de la désintégration α est :



Exemple :

L'uranium 238 est un émetteur α : ${}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^4_2He + \gamma$.

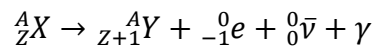
Remarque :

Les noyaux concernés sont ceux situés au-delà de la vallée de stabilité dans le graphique de Segré, trop lourds.

iv) **Radioactivité β^-**

Les noyaux se désintègrent en émettant un électron ${}_{-1}^0e$, appelé particule β^- et accompagné d'une autre particule élémentaire : un antineutrino ${}^0_0\bar{\nu}$.

Le bilan de la désintégration β^- est :



Exemple :

Le sodium est un émetteur β^- : ${}^{24}_{11}Na \rightarrow {}^{24}_{12}Mg + {}_{-1}^0e + {}^0_0\bar{\nu} + \gamma$.

Remarque 1 :

Les noyaux concernés sont ceux situés au-dessus de la vallée de stabilité dans le graphique de Segré.

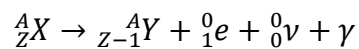
Remarque 2 :

Un antineutrino ${}^0_0\bar{\nu}$ est une particule élémentaire ne possédant pas de charge électrique, de masse très faible et interagissant uniquement par interaction faible.

v) **Radioactivité β^+**

Les noyaux se désintègrent en émettant un positon 0_1e , appelé particule β^+ et accompagné d'une autre particule élémentaire : un neutrino ${}^0_0\nu$.

Le bilan de la désintégration β^+ est :



Exemple :

Le néon est un émetteur β^+ : ${}^{19}_{10}Ne \rightarrow {}^{19}_9F + {}^0_1e + {}^0_0\nu + \gamma$.

Remarque 1 :

Les noyaux concernés sont ceux situés en-dessous de la vallée de stabilité dans le graphique de Segré.

Remarque 2 :

Un neutrino ${}^0_0\nu$ est une particule élémentaire ne possédant pas de charge électrique, de masse très faible et interagissant uniquement par interaction faible.

vi) **Récapitulatif**

Un noyau est radioactif s'il est instable.

Spontanément, il se transformera tôt ou tard en un autre noyau plus stable, et en émettant aussi d'autres particules.

Toutes les réactions nucléaires obéissent à des lois de conservation, appelées loi de Soddy.

On distingue trois types de radioactivité en fonction de la nature de la particule émise :

Radioactivité	Radioactivité α	Radioactivité β^-	Radioactivité β^+
Bilan de la désintégration	Emission d'un noyau d'hélium (α) ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 He + \gamma$	Emission d'un électron (β^-) ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e + {}^0_0 \bar{\nu} + \gamma$	Emission d'un positon (β^+) ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_1 e + {}^0_0 \nu + \gamma$

3) **Les réactions nucléaires provoquées**

a) **Définition**

Une réaction nucléaire est provoquée lorsqu'on bombarde un noyau cible par une particule projectile, pour donner naissance à de nouveaux noyaux. Comme les désintégrations radioactives, les réactions nucléaires provoquées respectent elles aussi les lois de conservation de Soddy.

Remarque :

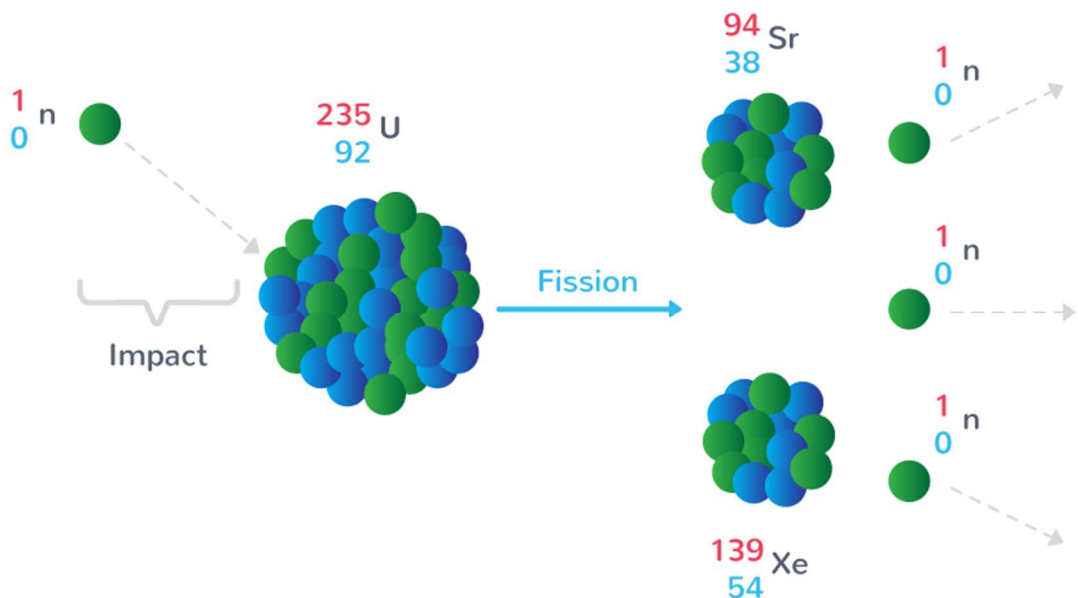
L'énergie libérée par une réaction nucléaire pour laquelle le défaut de masse Δm du noyau d'après la relation d'équivalence masse-énergie d'Albert Einstein (1879 – 1955) : $E_l = \Delta m \times c^2$.

b) **La fission nucléaire**

La fission nucléaire est une réaction nucléaire au cours de laquelle l'impact d'un neutron sur un noyau lourd provoque son éclatement en deux noyaux plus légers.

Exemple :

La réaction nucléaire de fission de l'uranium 235 provoquée par l'impact d'un neutron est : ${}^1_0 n + {}^{235}_{92} U \rightarrow {}^{94}_{38} Sr + {}^{139}_{54} Xe + 3 {}^1_0 n + \gamma + \gamma'$.



Les neutrons émis peuvent à leur tour impacter d'autres noyaux cibles ; on parle de réactions en chaîne.

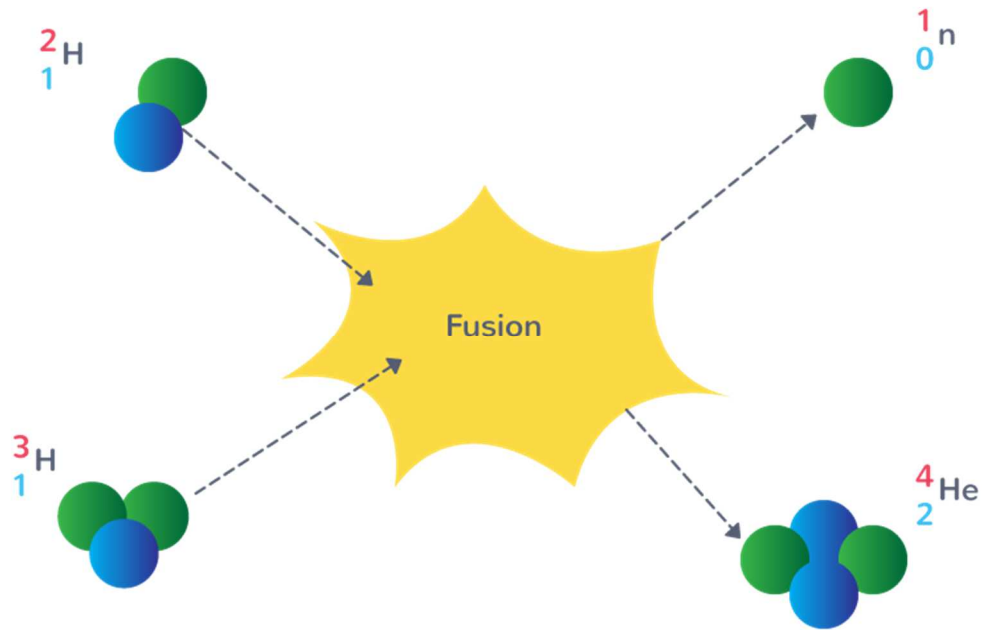
Ce phénomène est utilisé dans les réacteurs des centrales nucléaires.

c) La fusion nucléaire

La fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'associent pour former un noyau plus lourd.

Exemple :

La réaction nucléaire de fusion de deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium est : ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + \gamma$.



Pour que la fusion se produise, il faut des températures très élevées pour vaincre la répulsion entre les noyaux.

Les fusions nucléaires se produisent spontanément dans les étoiles, leur conférant leur énergie.

Remarque :

Cette réaction est très intéressante pour produire une énergie verte (sans déchets radioactifs) mais, pour l'instant, elle n'est pas suffisamment maîtrisée (projet ITER).

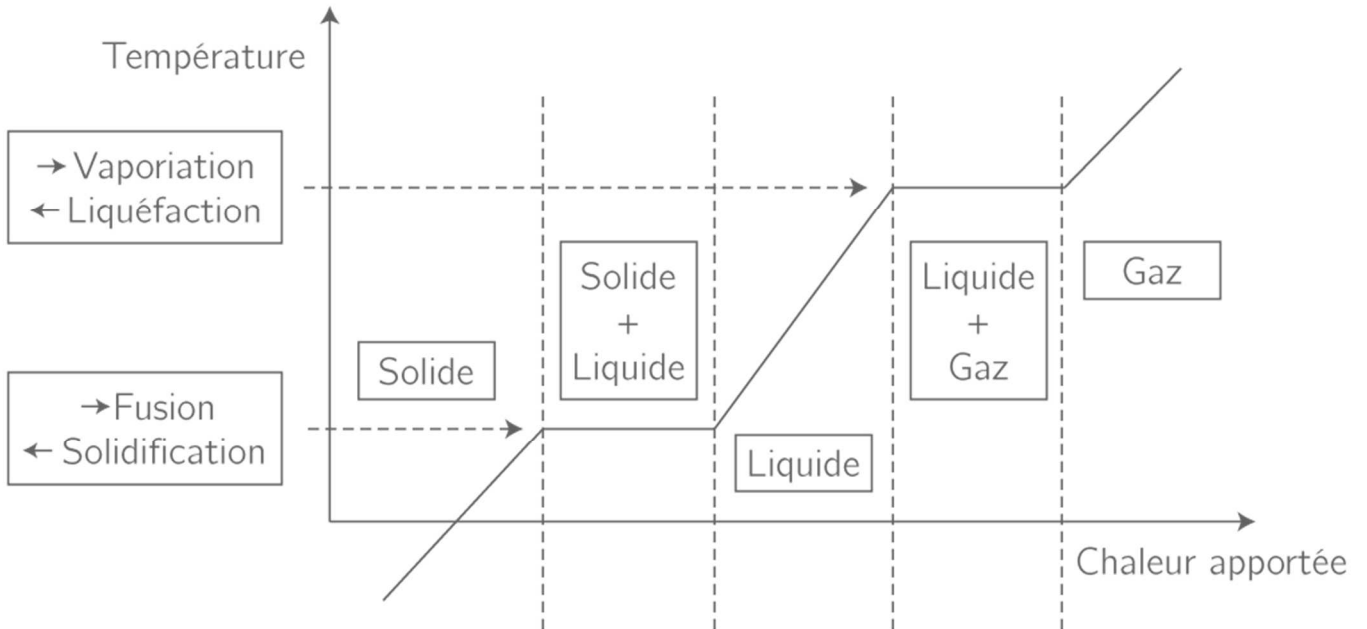
d) Récapitulatif

La fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd, dit fissile, est scindé en deux noyaux plus légers sous l'impact d'un neutron.

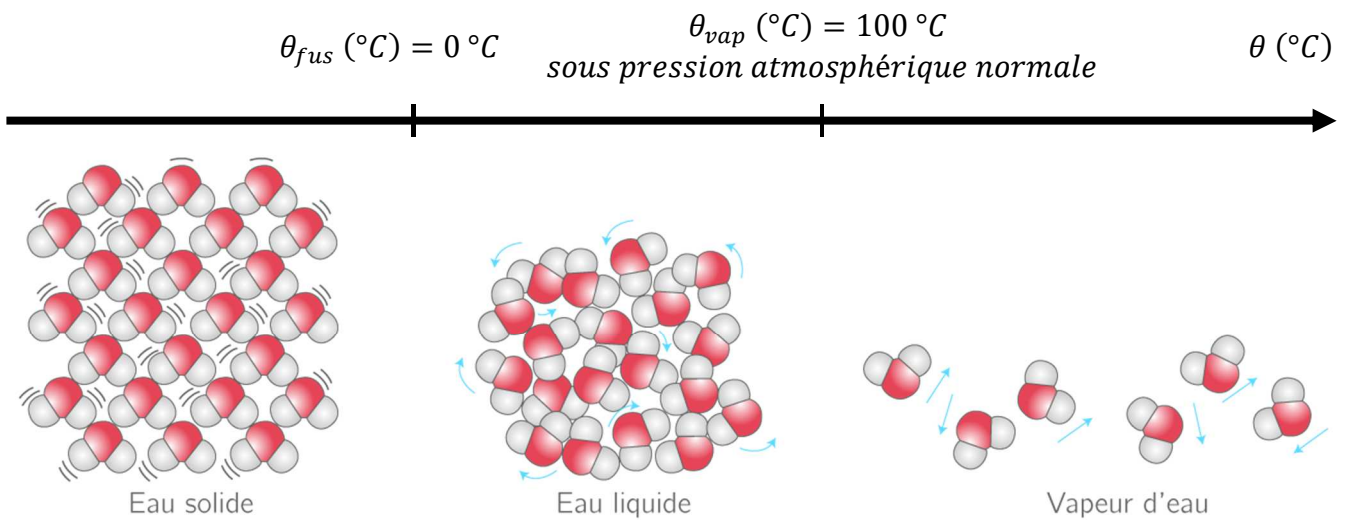
La fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour donner un noyau plus lourd.

ANNEXES

EVOLUTION DE LA TEMPERATURE D'UN CORPS PUR



EVOLUTION MICROSCOPIQUE ET CHANGEMENT D'ETAT



PARTICULES ELEMENTAIRES

		fermions (3 générations de la matière)			bosons (forces)	
		I	II	III		
masse →		2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0	électromagnétisme
charge →		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	
spin →		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
nom →		u up	c charm	t top	γ photon	
	Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0	interaction forte
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		d down	s strange	b bottom	g gluon	
	Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV	interaction faible
		0	0	0	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	Z⁰ boson Z ⁰	
		0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV	interaction faible
		-1	-1	-1	± 1	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		e électron	μ muon	τ tau	W[±] boson W	

HENRI BECQUEREL (1852 – 1908)



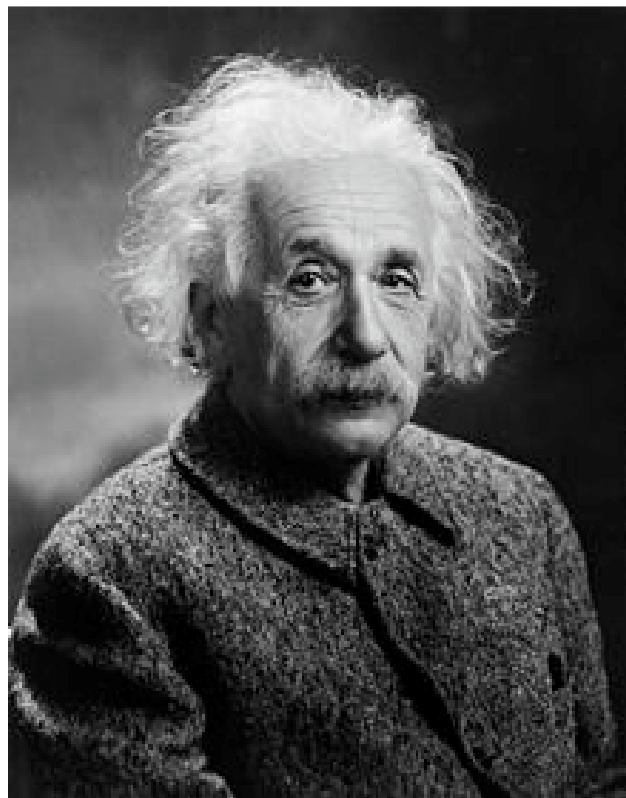
PIERRE CURIE (1859 – 1906)



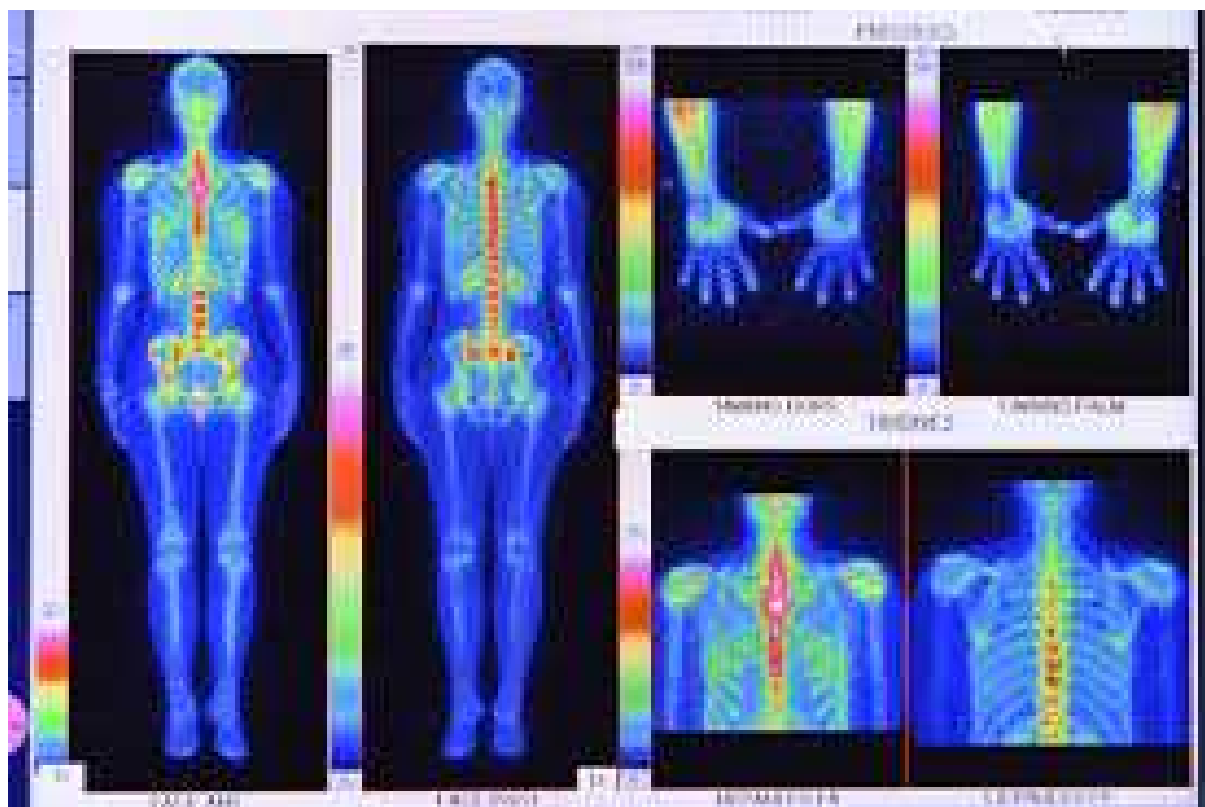
MARIE CURIE (1867 – 1934)



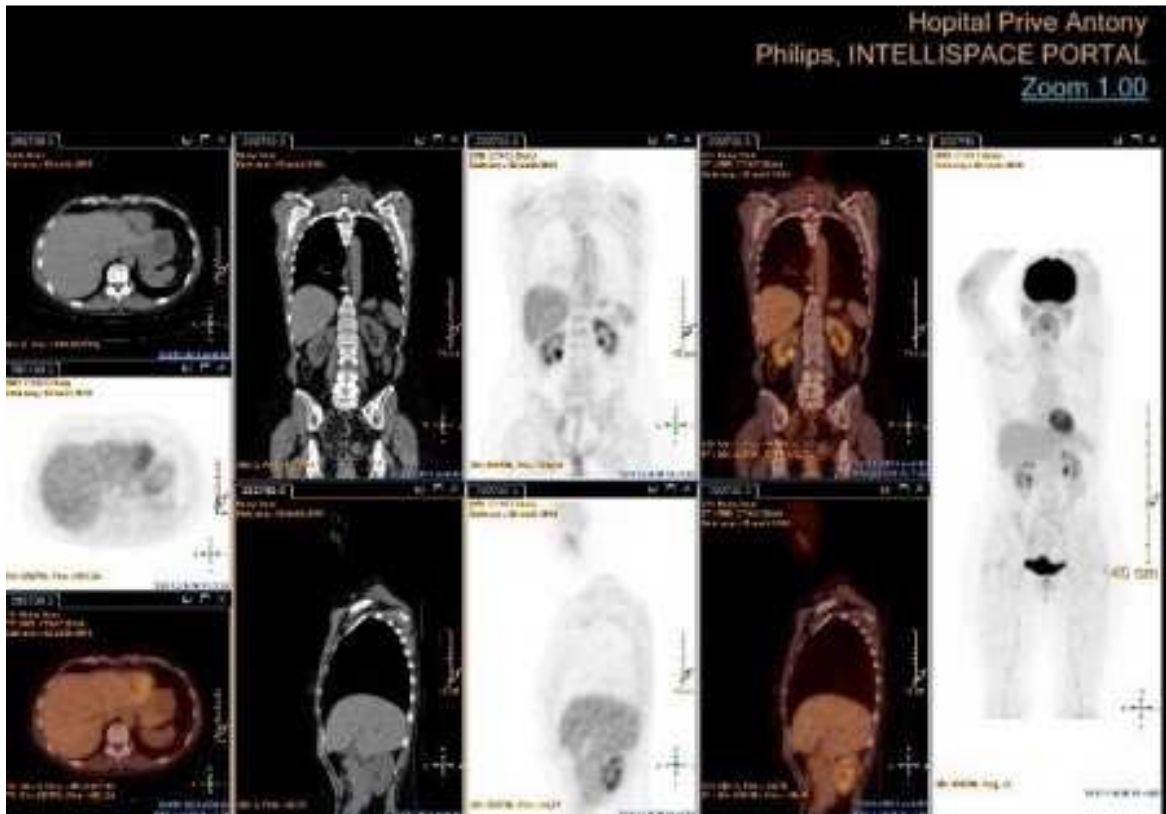
ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955)



SCINTIGRAPHIE



TEP



URANIUM 235

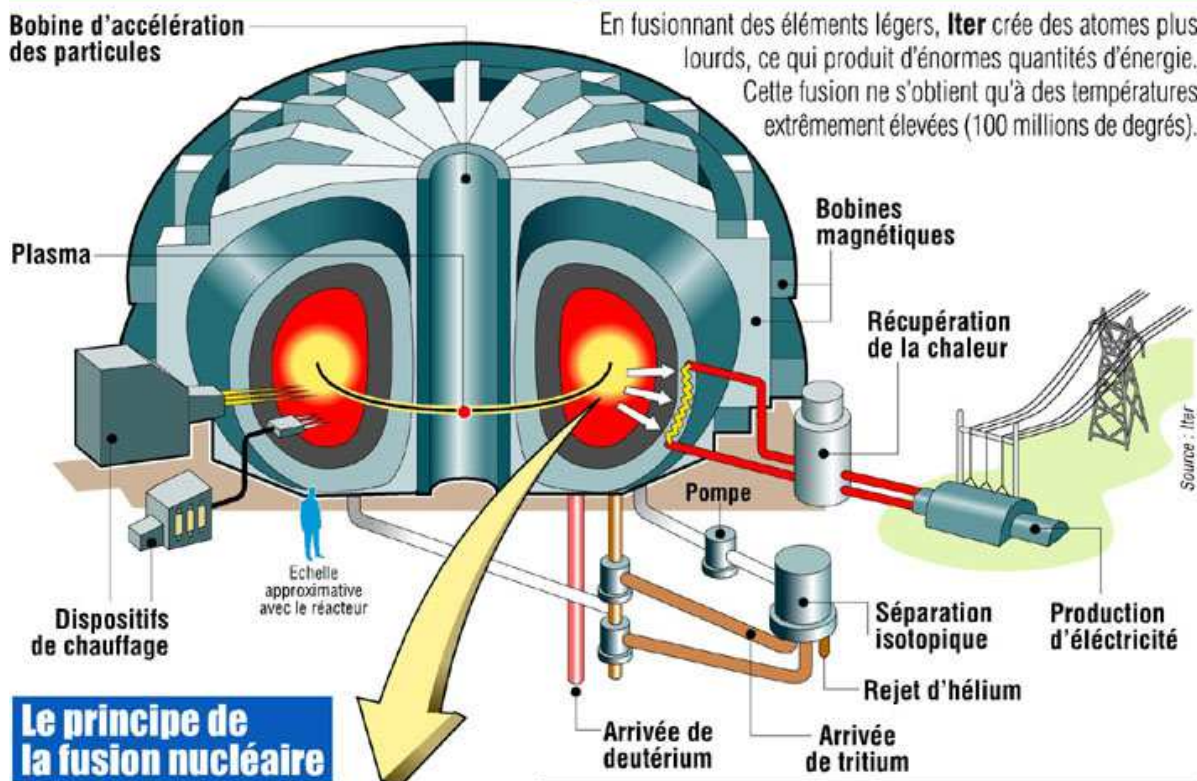


EXPLOSION NUCLEAIRE

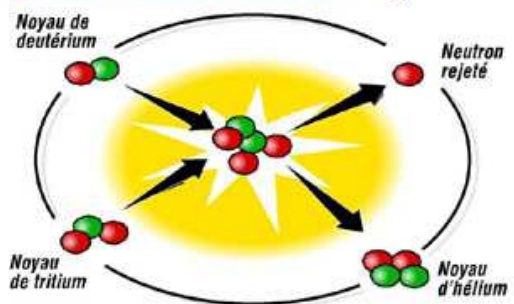


SCHEMA DU DISPOSITIF ITER

Comment ça marche ?



Le principe de la fusion nucléaire



Le cœur du réacteur Tore Supra. C'est dans cet anneau que le gaz chauffé, appelé "plasma", est maintenu en suspension grâce à des électroaimants supraconducteurs

● Neutron ● Proton

Le principe d'Iter sera de faire fusionner des noyaux de deutérium et de tritium, deux formes lourdes de l'hydrogène. Il en résulte une production d'hélium, de neutrons et une grande quantité d'énergie.