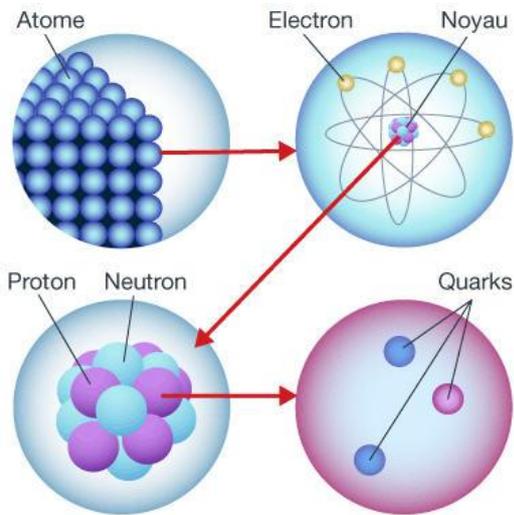


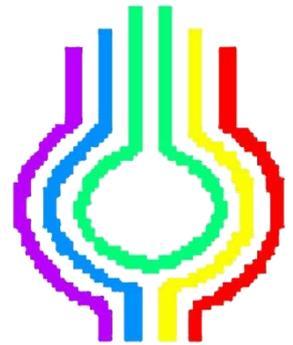
Première S



*Comprendre
Lois et modèles.*

**PHYSIQUE
CHIMIE
COURS**

Jallu L.



Quelles sont les causes physiques à l'œuvre dans l'Univers ?

Quelles interactions expliquent à la fois les stabilités et les évolutions physiques et chimiques de la matière ?

Quels modèles utilise-t-on pour les décrire ?

Quelles énergies leur sont associées ?

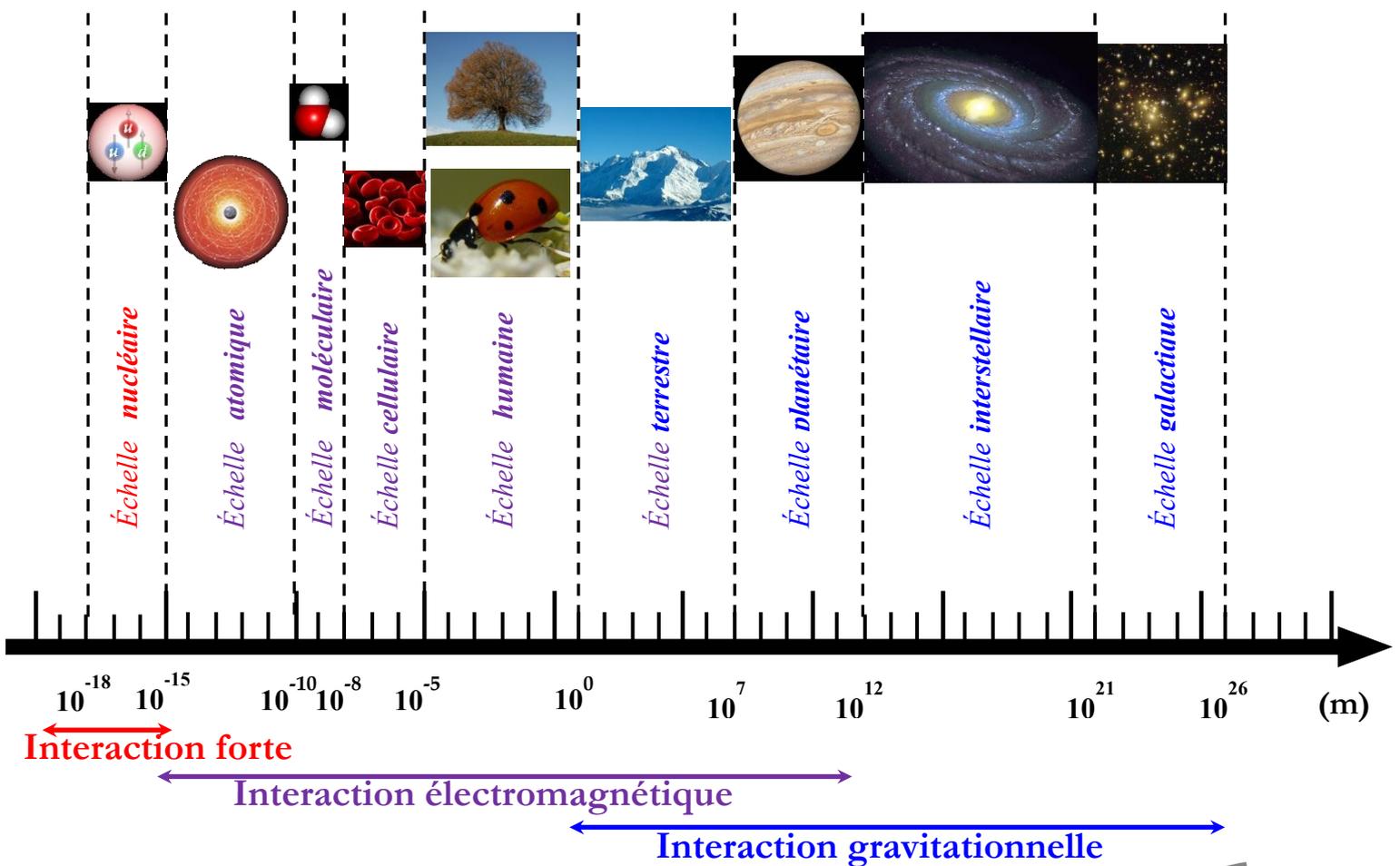
Sommaire

1. Cohésion et transformations de la matière	2
1.1. La matière à différentes échelles : du noyau à la galaxie _____	2
1.2. Particules élémentaires : électrons, neutrons, protons _____	5
1.3. Interactions fondamentales _____	7
1.3.1. Interaction gravitationnelle ou NEWTONIENNE _____	7
1.3.2. Interaction électromagnétique _____	9
1.3.3. Interactions forte et faible _____	14
1.4. Cohésion du noyau, stabilité _____	15
1.4.1. La Radioactivité naturelle _____	15
1.4.2. Les Radioéléments _____	20
1.4.3. Les rayonnements radioactifs _____	21
1.5. La décroissance radioactive _____	23
1.5.1. « Mourir sans vieillir » _____	23
1.5.2. Évolution temporelle d'un échantillon d'atomes radioactifs _____	23
1.5.3. Applications _____	24
1.6. L'énergie nucléaire : fusion et fission _____	25
1.6.1. Équivalence masse-énergie _____	26
1.6.2. Énergie de liaison _____	29
1.6.3. Fusion et fission nucléaires _____	31
1.7. Cohésion des solides _____	35
1.7.1. Solide ionique _____	35
1.7.2. Solide moléculaire _____	37
1.7.3. Changement d'état et interactions _____	41
1.7.4. Dissolution de composés solides ou moléculaires _____	43
1.8. Nomenclature des alcanes et des alcools ; formule semi-développée _____	45
1.8.1. Trois familles d'hydrocarbures _____	45
1.8.2. La formule semi développée _____	49
1.8.3. Alcools R-OH _____	50
1.8.4. Température de changement d'état _____	51
1.8.5. Miscibilité des alcools avec l'eau _____	52
1.8.6. Le bioéthanol _____	54
2. Champs et forces.....	57
2.1. Exemples de champs scalaires et vectoriels : pression, température, vitesse dans un fluide _____	57
2.2. Champ magnétique : sources de champ magnétique (Terre, aimant, courant) _____	59
2.3. Champ électrostatique _____	60
2.4. Champ de pesanteur local _____	62
3. Formes et principe de conservation de l'énergie	63

1. Cohésion et transformations de la matière

1.1. La matière à différentes échelles : du noyau à la galaxie

⇒ Description



D'après : <http://voyage.in2p3.fr/>

Tous les **processus physiques, chimiques ou biologiques** connus peuvent être expliqués à l'aide de seulement **quatre interactions fondamentales** :

- **l'interaction gravitationnelle**, responsable de la pesanteur, de la marée ou encore des phénomènes astronomiques,
- **l'interaction électromagnétique**, responsable de l'électricité, du magnétisme, de la lumière ou encore des réactions chimiques et biologiques,
- **l'interaction forte**, responsable de la cohésion des noyaux atomiques,
- **l'interaction faible**, responsable de la radioactivité beta, qui permet au Soleil de briller.

La théorie qui décrit la gravitation est la **relativité générale**, celle qui décrit les trois autres est le « **modèle standard** ».

info

⇒ L'interaction gravitationnelle

L'interaction gravitationnelle est une force **toujours attractive** qui agit sur toute forme d'énergie, mais avec une **intensité extrêmement faible** (c'est l'interaction la plus faible des quatre interactions fondamentales). Ainsi, ses effets ne sont perceptibles que lorsque des objets très **massifs** (la masse est une forme d'énergie) sont en jeu, c'est le cas pour les objets astronomiques.

L'énorme masse des **étoiles**, des **planètes** ou des **galaxies** les rend donc très sensibles à la gravitation et c'est la seule interaction en jeu pour **expliquer les mouvements** de ces objets.

De même, l'énorme masse de la Terre (6×10^{24} kg, soit six mille milliards de milliards de tonnes !) la rend très attractive pour des objets moins massifs. Ainsi, la **pesanteur** et donc le **poids** des objets sur Terre sont le résultat de l'attraction gravitationnelle de la Terre sur ces objets. C'est pourquoi, le poids d'un objet est plus faible sur la Lune que sur Terre, puisque la masse de la Lune est plus faible que celle de la Terre.

Enfin, c'est l'attraction gravitationnelle de la Lune sur l'eau des océans (dont la masse totale est importante) qui permet d'expliquer le phénomène des **marées**.

Le premier à avoir compris que la pesanteur terrestre et les mouvements astronomiques étaient le résultat d'une seule et même interaction est Isaac Newton, qui publia en 1687 un livre dans lequel il a établi les lois de la gravitation. Il fallut ensuite attendre 1915 pour qu'Albert Einstein développe la théorie de la **relativité générale**, qui permet d'expliquer la gravitation par une théorie géométrique mais non quantique. La gravitation n'est donc pas du tout prise en compte par la physique des particules, mais son intensité est totalement négligeable à l'échelle des particules élémentaires.

⇒ L'interaction électromagnétique

L'interaction électromagnétique est une force **répulsive ou attractive** qui agit sur les objets ayant une **charge électrique**. Deux objets de charges électriques de **mêmes signes** se repoussent alors que deux objets de charges électriques de **signes opposés** s'attirent. Comme les atomes sont **électriquement neutres**, il y a peu d'effet de cette interaction à grande échelle.

L'interaction électromagnétique est bien sûr à l'origine de tous les phénomènes **électriques** et **magnétiques**.

L'interaction électromagnétique permet aussi la **cohésion des atomes** en liant les électrons (charge électrique négative) et le noyau des atomes (charge électrique positive). Cette même liaison permet de combiner les atomes en molécules et l'interaction électromagnétique est donc responsable des **réactions chimiques**. Enfin, la chimie de certaines classes de molécules permet d'expliquer la **biologie**.

Cette interaction peut, dans certaines conditions, créer des **ondes électromagnétiques**, parmi lesquelles on distingue la **lumière**, les ondes **radio**, les ondes **radar**, les **rayons X**...

En bref, l'interaction électromagnétique permet d'expliquer presque tous les phénomènes de la vie quotidienne (mis à part la pesanteur)...

La première grande étape dans la compréhension de l'électromagnétisme vient de l'**unification de l'électrodynamique et du magnétisme** en une seule et même interaction par J. C. Maxwell en 1860. Puis, en 1864, Maxwell comprit que la **lumière** était une onde électromagnétique. Enfin, en 1887, H. Hertz montre l'existence d'**ondes électromagnétiques** autres que la lumière.

Quelques années plus tard, la mécanique quantique se développe et la théorie de l'électromagnétisme est quantifiée, la nature quantique de cette interaction (l'existence du **photon**) ayant déjà été découverte par Einstein en 1905. Finalement, après la résolution de problèmes techniques, la première théorie à la fois quantique et relativiste est achevée dans les années 1948-49 par Tomonaga, Schwinger et Feynman, c'est l'**électrodynamique quantique** ou **QED**.

⇒ L'interaction forte

L'*interaction forte est une force qui agit sur les **quarks** et par extension sur les **hadrons**. Les **leptons** y sont totalement insensibles.*

*L'interaction forte permet la **cohésion des noyaux atomiques** en liant les **protons** et les **neutrons** entre eux au sein de ce noyau. Si cette interaction n'existait pas, les noyaux ne pourraient pas être stables et seraient dissociés sous l'effet de la répulsion électrostatique des protons entre eux.*

*L'interaction forte est aussi responsable des **réactions nucléaires**, source d'énergie des étoiles et donc du **Soleil**.*

*L'histoire des interactions fortes commence en 1911 avec la découverte du **noyau atomique** par Rutherford. En effet, il fallut trouver une nouvelle force pour expliquer que les noyaux atomiques ne se disloquent pas sous l'effet électrique répulsif des protons entre eux. Néanmoins, il fallut attendre 1967-70 et le développement du **modèle des quarks** pour que la théorie de l'interaction forte soit élaborée, c'est à dire la **chromodynamique quantique** ou **QCD**.*

⇒ L'interaction faible

L'*interaction faible est une force qui agit sur toutes les particules. En particulier, c'est la seule force à laquelle sont sensibles les **neutrinos**.*

*L'interaction faible est responsable de la radioactivité **beta** qui permet les réactions nucléaires qui sont la source d'énergie du **Soleil**. La radioactivité naturelle est probablement aussi une source d'énergie importante pour maintenir le **magma en fusion** sous la croûte terrestre.*

L'histoire de l'interaction faible commence bien sûr en 1896 avec la découverte de la radioactivité par Becquerel. Il faut ensuite attendre 1933 pour qu'E. Fermi élabore le premier modèle des interactions faibles en incorporant l'existence non encore démontrée du neutrino. Puis, en 1961, S. L. Glashow tente d'unifier l'interaction faible et l'électromagnétisme en une seule interaction électrofaible. Cette unification prédit l'existence d'une interaction faible par courant neutre qui est découverte en 1973. Elle prédit aussi l'existence de vecteurs de cette interaction, les W^+ , W^- et Z^0 , qui sont à leur tour découverts en 1983.

⇒ La Physique subatomique des particules

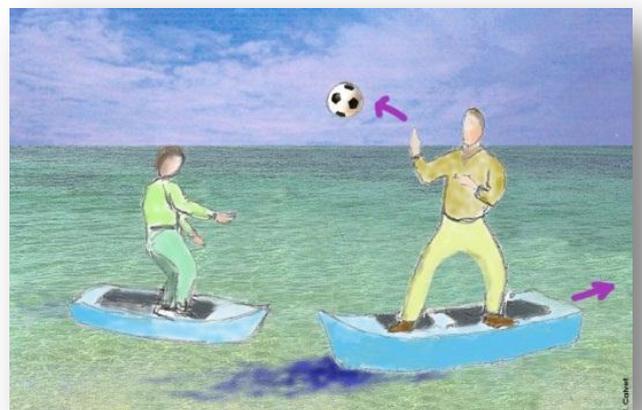
L'*es interactions sont expliquées en physique des particules comme l'échange entre particules de matière de particules de rayonnement.*

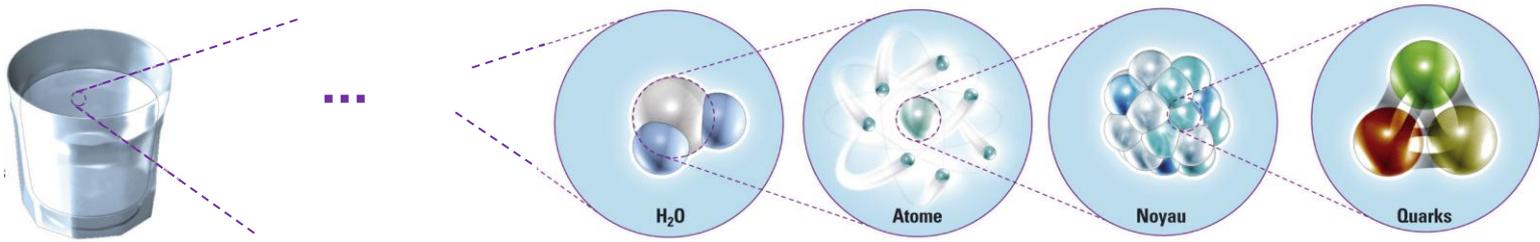
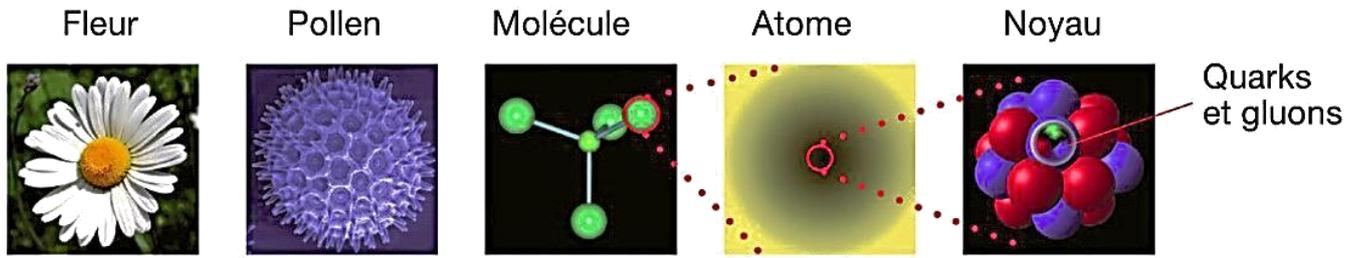
*Le dessin montre deux barques qui s'éloignent l'une de l'autre car leurs occupants échangent un ballon (par le principe d'action-réaction bien connu). Il y a donc **interaction** à distance entre les deux barques par **échange** d'un objet intermédiaire (le ballon). Cet objet est appelé le **vecteur** de l'interaction.*

Ainsi, en physique des particules, on explique toute interaction entre particules par l'échange entre ces particules de vecteurs (qui sont eux-mêmes des particules).

*On peut aussi imaginer que plus le ballon est **lourd**, plus il sera difficile aux occupants du bateau de le lancer **loin**. Ainsi, si le ballon est trop lourd, les bateaux ne pourront plus interagir au-delà d'une certaine distance.*

*De même, en physique des particules, plus la « particule **vecteur** » d'une interaction sera lourde, plus cette interaction sera de **courte portée**.*





1.2. Particules élémentaires : électrons, neutrons, protons

Les particules élémentaires du modèle standard sont au nombre de 24 :

- **12 bosons** qui sont les **particules de « rayonnement »** et qui sont les vecteurs des différentes interactions :
 - 8 **gluons** qui transmettent l'interaction forte,
 - les **W⁺** et **W⁻** qui transmettent l'interaction faible,
 - le **Z⁰** qui transmet une forme de l'interaction faible provenant de l'interaction électrofaible,
 - le **photon** qui transmet l'interaction électromagnétique.
- 12 **fermions** qui sont les **particules de « matière »**, séparées en deux catégories :
 - 6 **quarks** et leurs anti-quarks, qui forment des particules composites : les **hadrons**,
 - 6 **leptons** et leurs anti-leptons.

	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	
	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	
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon	
	<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	
Leptons	e électron	μ muon	τ tau	W[±] boson W	

⇒ L'électron

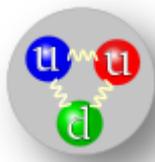
L'électron est une particule élémentaire de la famille des leptons. La masse d'un électron est approximativement $9,109 \times 10^{-31}$ kg. L'électron est d'environ 1836 fois léger que le proton.

Les électrons ont une charge électrique de $-1,602 \times 10^{-19}$ C, utilisée comme unité standard de charge pour les particules subatomiques. La charge de l'électron est directement opposée à celle du proton. Comme le symbole « e » est utilisé pour la charge élémentaire, le symbole de l'électron est « e⁻ », le signe - indiquant la charge de l'électron.

Le symbole du **positron** est « e⁺ », puisqu'il a toutes les propriétés de l'électron, au signe de la charge près.

⇒ Le Proton

Le proton est un fermion. Il est composé des deux quarks up et le quark down du transmise par des gluons.



de trois quarks, ce qui en fait un baryon. proton sont liés par l'interaction forte,

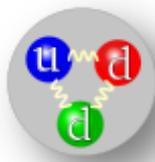
Le terme « baryon » vient du grec « barys » qui signifie « lourd » ; il se réfère au fait que les baryons sont en général plus lourds que les autres types de particules

La masse du proton est égale à environ $1,673 \times 10^{-27}$ kg. La masse du proton est environ 1 836fois celle de l'électron. Sa charge électrique est très exactement égale à une charge élémentaire positive « e », soit $+1,602176 \times 10^{-19}$ C ; l'électron possède une charge électrique négative, de valeur opposée à celle du proton. La charge électrique du proton est égale à la somme des charges électriques de ses quarks : celle de chaque quark up vaut $2/3e$ et celle du quark down vaut $-1/3e$ et sa taille est d'environ **84fm**.

Le proton est un nucléon et peut être lié à d'autres nucléons par la force nucléaire à l'intérieur d'un noyau atomique.

⇒ Le Neutron

Le neutron est un fermion. Il est composé baryon. Les deux quarks down et le quark l'interaction forte, transmise par des



de trois quarks, ce qui en fait un up du neutron sont liés par gluons.

La masse du neutron est égale à environ $1,675 \times 10^{-27}$ kg. Le neutron est 1,0014 plus massif que le proton.

Sa charge électrique est très exactement nulle, étant égale à la somme des charges électriques de ses quarks : celle du quark up vaut $2/3e$ et celle de chaque quark down vaut $-1/3e$.

Tout comme le proton, le neutron est un nucléon et peut être lié à d'autres nucléons par la force nucléaire à l'intérieur d'un noyau atomique.

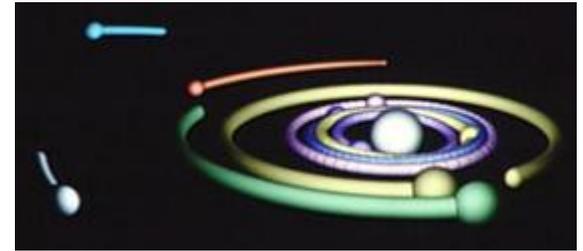
Rappels

- Le nombre de protons d'un noyau (son numéro atomique, noté Z) détermine les propriétés chimiques de l'atome et donc quel élément chimique il représente ; le nombre de neutrons détermine en revanche l'isotope de cet élément.
- Le nombre de masse (noté A) est le nombre total de nucléons du noyau.

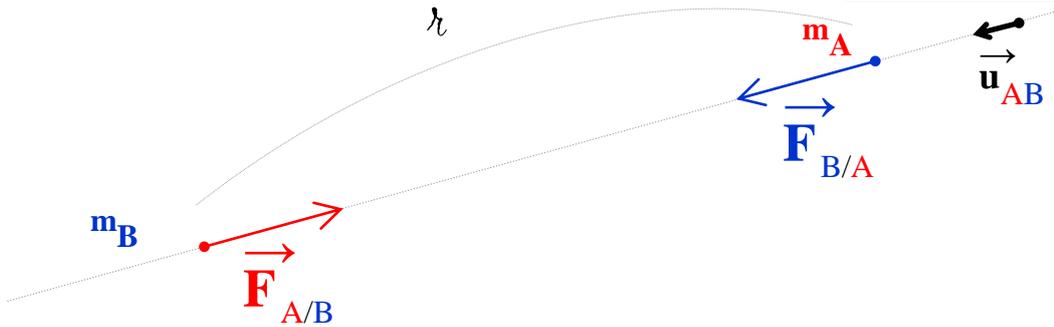
1.3. Interactions fondamentales

1.3.1. Interaction gravitationnelle ou NEWTONIENNE

⇒ L'interaction gravitationnelle de Newton



$$\vec{F}_{A/B} = -G \frac{m_A \times m_B}{\lambda^2} \vec{u}_{AB}$$



$G = 6,67\ 428\ 76 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$ est la « constante de gravitation universelle ».

- $\vec{F}_{A/B}$ **direction** = segment (A, B),
- sens** = attraction gravitationnelle dirigée vers A,
- norme** = $F_{A/B} = G \frac{m_A \times m_B}{\lambda^2}$ en Newton (N).

Conformément au principe d'action réciproque : $\vec{F}_{B/A} = -\vec{F}_{A/B}$ soit $\vec{F}_{B/A} + \vec{F}_{A/B} = \vec{0}$

• **La gravité est la plus faible des 4 forces fondamentales mais elle a une portée infinie.**

Exemple

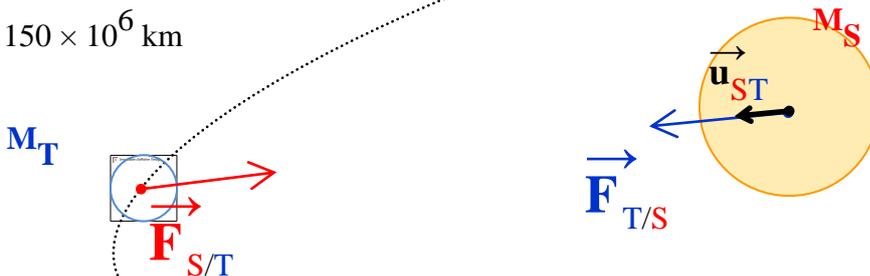
➤ Système Soleil - Terre :

$$\vec{F}_{S/T} = -G \frac{M_S \times M_T}{d_{ST}^2} \vec{u}_{ST}$$

$M_S = 1,98\ 91 \times 10^{30} \text{ kg}$

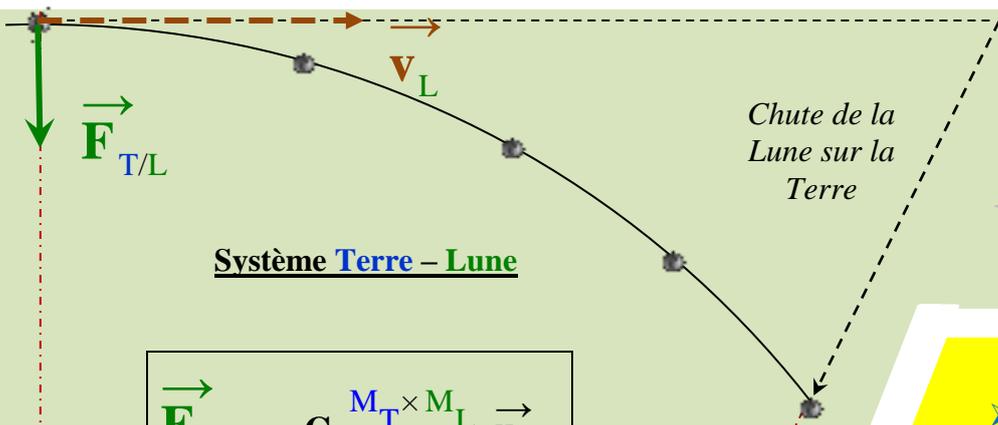
$M_T = 5,97\ 36 \times 10^{24} \text{ kg}$

$d_{ST} = 150 \times 10^6 \text{ km}$



Le passage de masses ponctuelles au système d'astres nécessite de modéliser ceux-ci en **sphères à répartition homogène** : Ce sont alors les centres des sphères qui sont à considérer dans la loi de gravitation, auxquels on attribue la masse totale de chaque astre. Par ailleurs, les calculs ne porteront que sur un **point « grave » extérieur à la sphère attractrice.**

$$F_{T/S} = F_{S/T} = 6,67\ 428\ 76 \times 10^{-11} \times \frac{1,9891 \times 10^{30} \times 5,9736 \times 10^{24}}{(150 \times 10^9)^2} = 3,52 \times 10^{22} \text{ N}$$

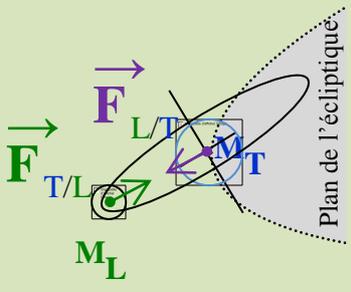


Système Terre - Lune

Chute de la Lune sur la Terre

- $M_T = 5,9736 \times 10^{24} \text{ kg}$
- $M_L = 7,349 \times 10^{22} \text{ kg}$
- $d_{ST} = 384 \times 10^3 \text{ km}$

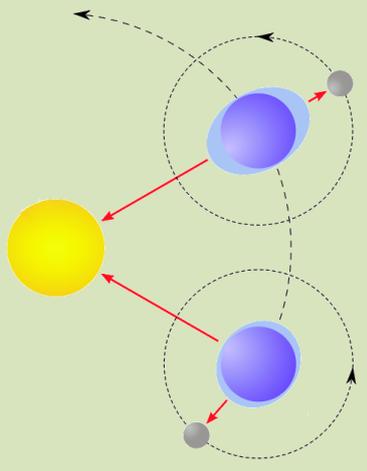
$$\vec{F}_{T/L} = -G \frac{M_T \times M_L}{d_{TL}^2} \vec{u}_{TL}$$



Plan de l'écliptique

d_{TL}

Les marées



Système Terre - pomme

$$\vec{F}_{T/p} = -G \frac{M_T \times m_p}{(R_T + h_p)^2} \vec{u}_{Tp}$$

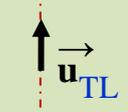
- $M_T = 5,9736 \times 10^{24} \text{ kg}$
- $R_T = 6\,371,0 \text{ km}$
- $m_p = 0,10 \text{ kg}$
- $h_p = 1,0 \text{ m}$

$$\begin{aligned} \vec{F}_{T/p} &= \vec{F}_{p/T} = 9,8 \times 10^{-1} \text{ N} \\ &= 6,67 \times 10^{-11} \times \frac{5,9736 \times 10^{24} \times 0,10}{(1,0 + 6\,371,0 \times 10^3)^2} \vec{u}_{Tp} \end{aligned}$$



h_p

R_T



$$\begin{aligned} \vec{F}_{T/L} = \vec{F}_{L/T} &= 1,99 \times 10^{20} \text{ N} \\ &= 6,67 \times 10^{-11} \times \frac{5,9736 \times 10^{24} \times 7,349 \times 10^{22}}{(384 \times 10^6)^2} \end{aligned}$$

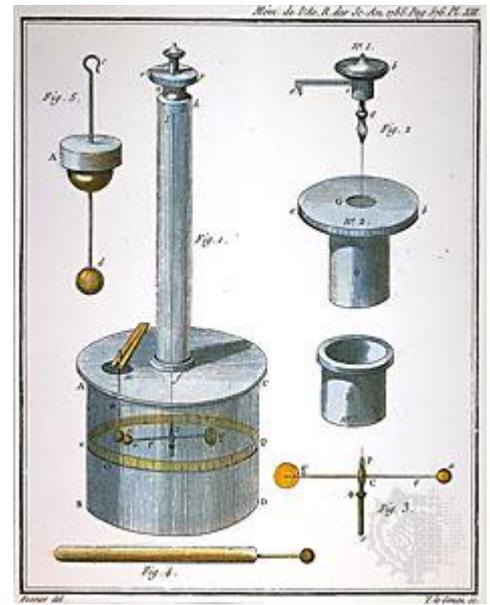
1.3.2. Interaction électromagnétique

Il existe deux types de charges électriques : **Positive** des protons, **Négative** des électrons.

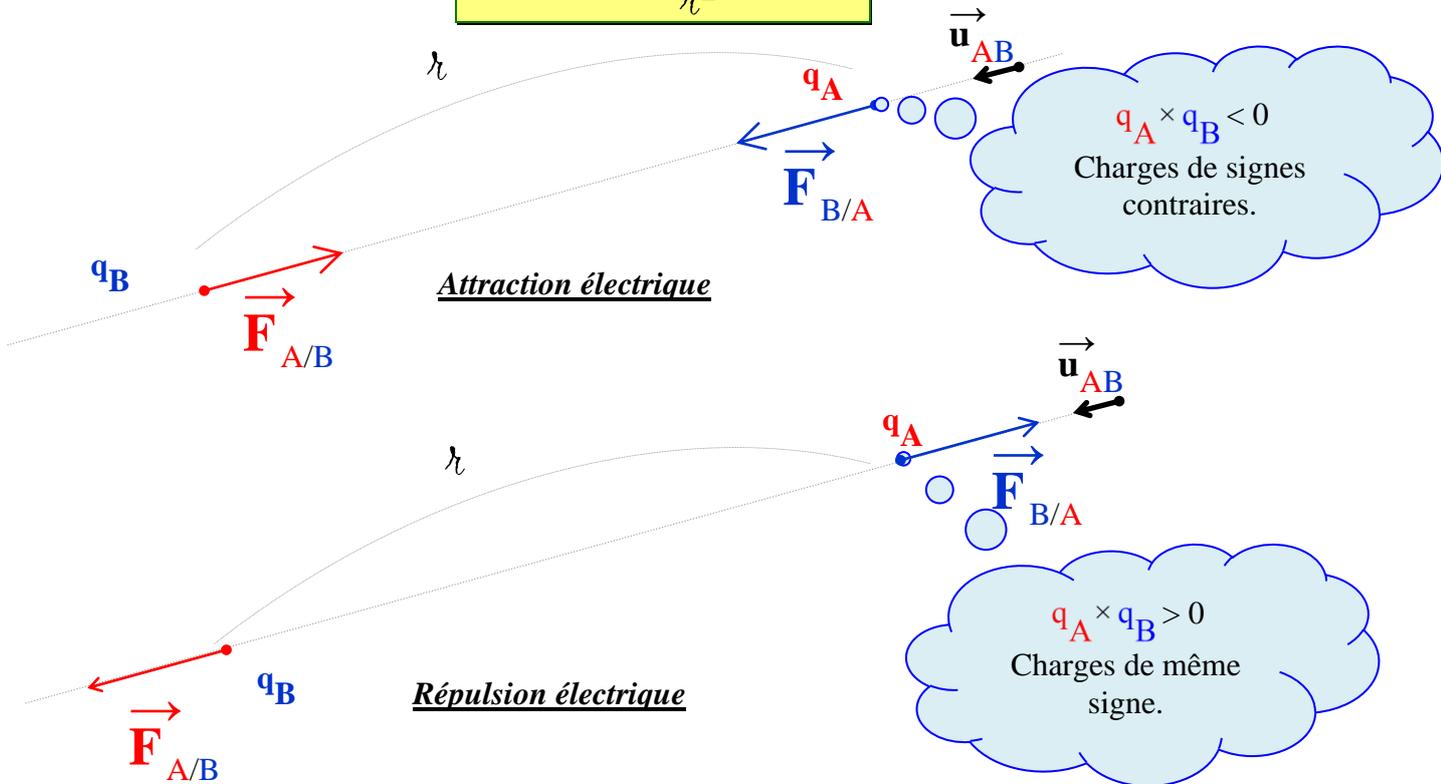
e ⁻	$q_{e^-} = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C} = -e$
p ⁺	$q_{p^+} = +1,6 \times 10^{-19} \text{ C} = +e$

« e » est la « **charge élémentaire** ».

⇒ L'interaction électrique de Coulomb



$$\vec{F}_{A/B} = k \frac{q_A \times q_B}{\lambda^2} \vec{u}_{AB}$$



$k = 8,987\ 551\ 79 \times 10^9 \text{ N.m}^2.\text{C}^{-2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ est la « **constante de Coulomb** ».

($\epsilon_0 = 8,854\ 187\ 817 \times 10^{-12}$ la constante diélectrique « permittivité du vide » décrit la réponse du vide à l'interaction électrique).

$\vec{F}_{A/B}$:

- direction** = segment (A, B),
- sens** = attraction ou répulsion électrique selon le signe de $q_A \times q_B$,
- norme** = $F_{A/B} = k \frac{q_A \times q_B}{\lambda^2}$ en Newton (N).

Conformément au **principe d'action réciproque** : $\vec{F}_{B/A} = -\vec{F}_{A/B}$ soit $\vec{F}_{B/A} + \vec{F}_{A/B} = \vec{0}$

Exemples

➤ Système Proton - Électron :

$$\vec{F}_{P/E} = k \frac{q_{P+} \times q_{e-}}{d_{PE}^2} \vec{u}_{PE}$$

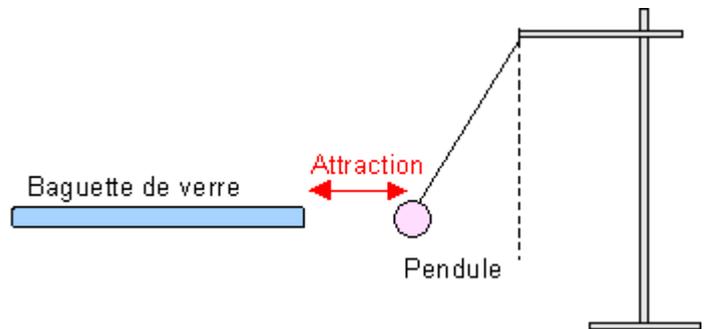
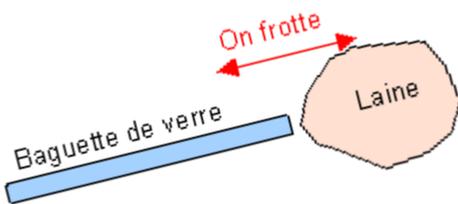
dans l'atome d'hydrogène

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{P+} = +e \\ q_{e-} = -e \\ e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \\ d_{PE} = 53 \text{ pm} \end{array} \right.$$

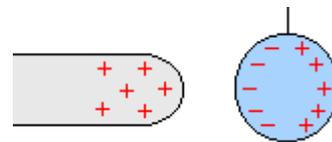
$$\vec{F}_{T/S} = \vec{F}_{S/T} = 8,987\,551\,79 \times 10^9 \times \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 1,6 \times 10^{-19}}{(53 \times 10^{-12})^2} = 8,2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

⇒ Phénomène d'électrisation

▪ Électrisation par frottement

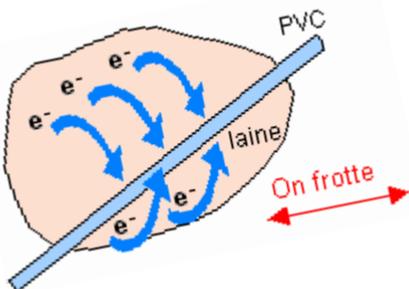


- Lorsqu'on frotte, la baguette sur la laine, il se produit un transfert d'électrons de la laine vers la baguette.
- Sous l'influence de la baguette chargée positivement, les électrons sont attirés ou repoussés d'un côté de la boule.

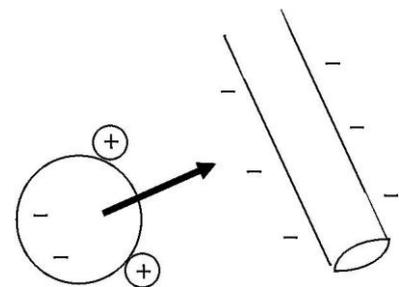
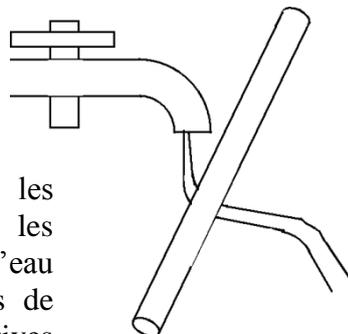


TP

Lors de l'électrisation, une règle en PVC arrache des électrons à la laine.



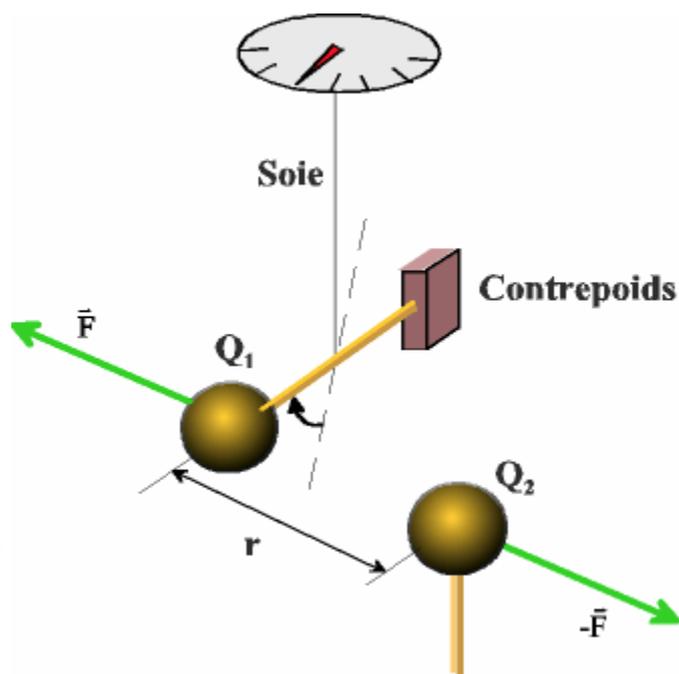
Quand on approche du jet la règle chargée négativement, les molécules d'eau s'orientent de telle manière que le barycentre des charges positives soit plus proche de la règle que le barycentre des charges négatives.



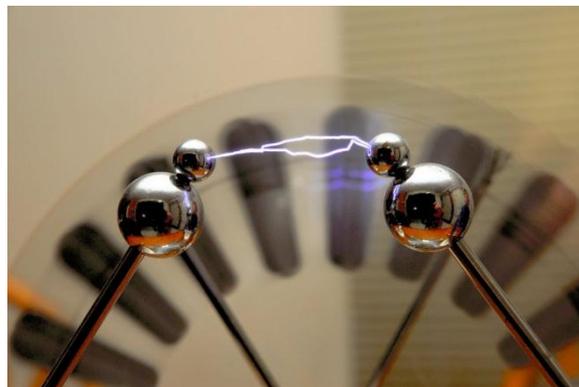
La molécule d'eau est polaire

Les forces d'attraction entre les charges négatives de la règle et les charges positives des molécules d'eau sont plus grandes que les forces de répulsion entre les charges négatives de la règle et les charges négatives des molécules d'eau

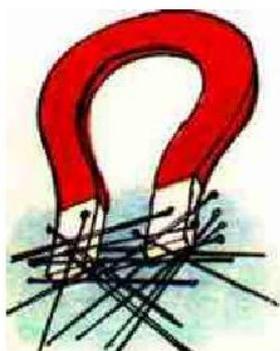
- Balance de Coulomb



- machine de Wimshurst

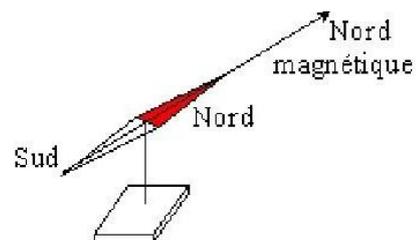


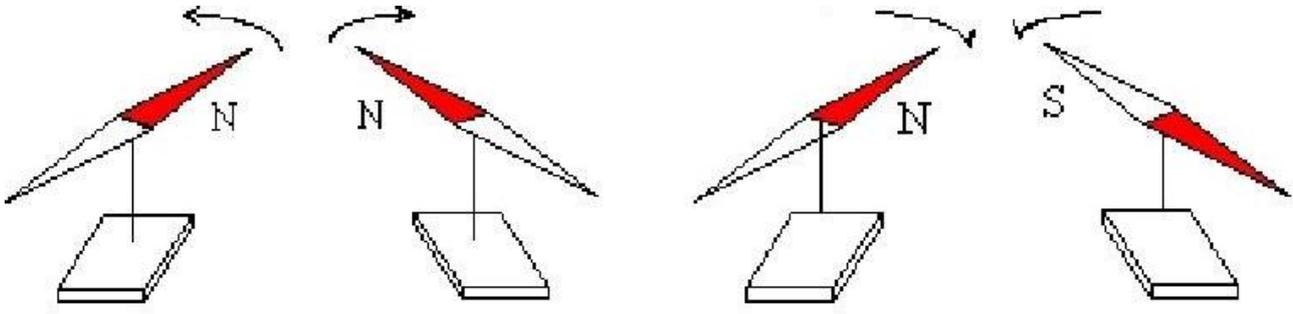
⇒ L'interaction magnétique



La « pierre d'aimant » qui a la propriété d'attirer les petits morceaux de fer, est connue depuis l'antiquité grecque (il y a 2600 ans). On trouve cette pierre étonnante dans la région de MAGNÉSIE, en Asie Mineure. On sait aujourd'hui qu'elle est formée essentiellement d'oxyde de Fer Fe_3O_4 que l'on appelle magnétite.

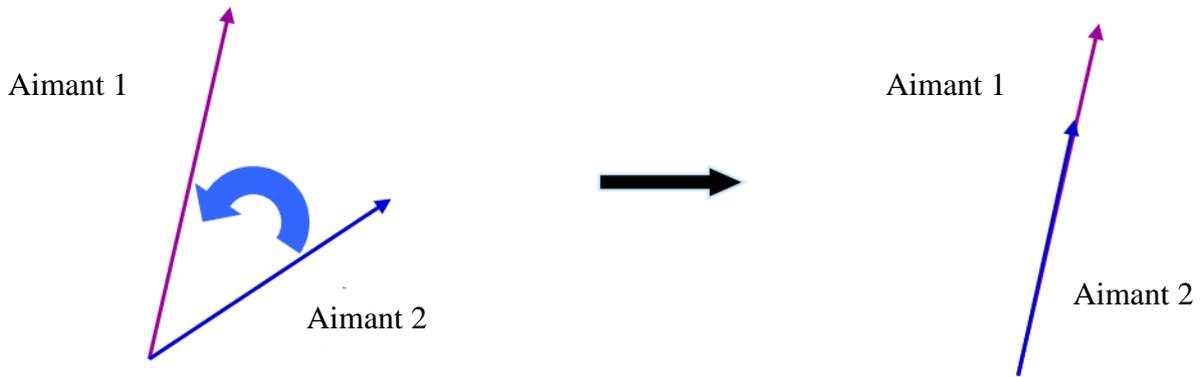
Façonnée et polie en forme de cuiller, elle se fait boussole en Chine dès le III^{ème} siècle. Sa pièce principale est une aiguille d'acier que l'on a aimantée par frottement contre une pierre d'aimant.





Deux pôles de même nom se repoussent alors que deux pôles de noms différents s'attirent.

La force exercée entre dipôles magnétiques repose sur le principe de la recherche de l'énergie d'interaction minimale.



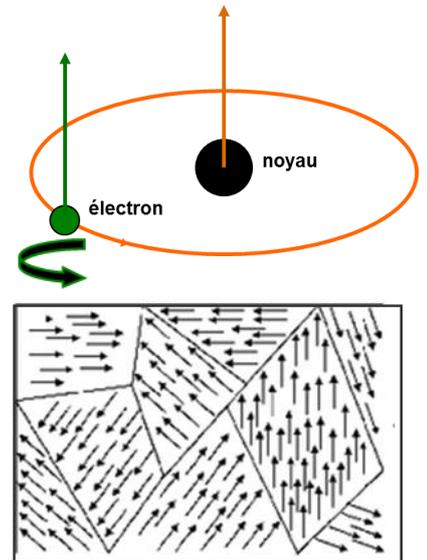
Cela explique l'attraction ou la répulsion de 2 aimants, celui qui est repoussé cherche à tourner pour finalement présenter le pôle où il y aura attraction.

- au niveau atomique

Un électron tournant autour du noyau crée un moment magnétique orbital, un électron tournant sur lui-même (spin) crée un moment magnétique de spin.

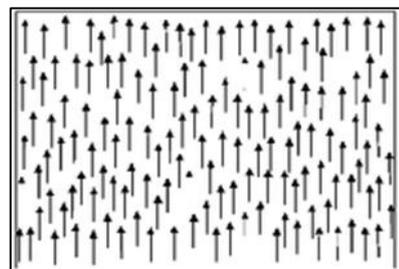
Le moment magnétique (atomique) tient compte des deux contributions. Si les atomes possèdent des couches incomplètes alors ils possèdent un moment magnétique atomique.

Lorsque l'on regarde, au niveau microscopique la structure de la matière d'un matériau ferromagnétique, on remarque l'existence de petits domaines d'aimantation homogène c'est à dire des lieux où les moments atomiques « jouent » collectifs, ils sont orientés dans une même direction. On appelle ces domaines les domaines de Weiss.

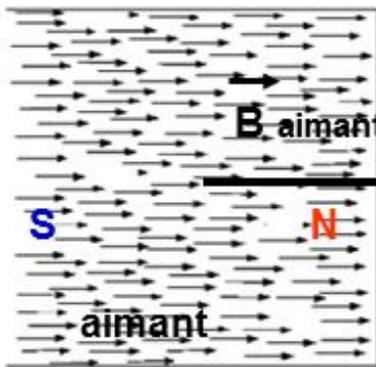


Pierre Weiss (1865-1940), physicien, Membre de l'académie des sciences.

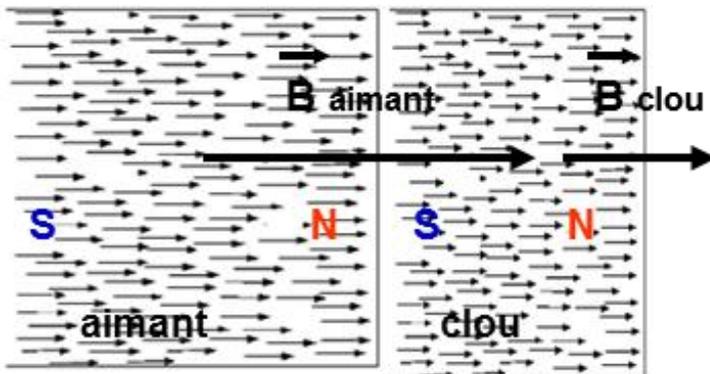
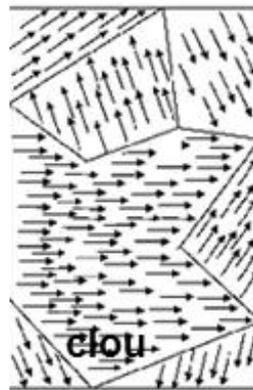
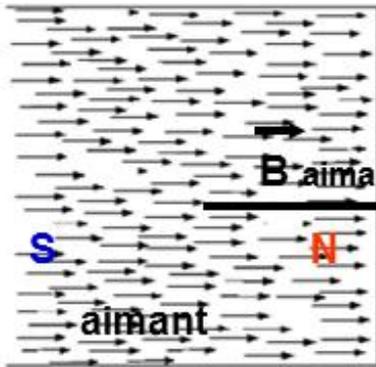
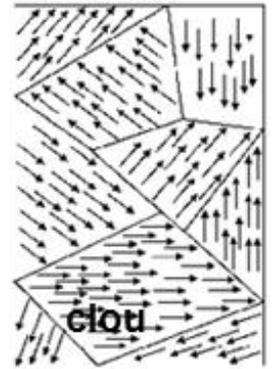
Un aimant permanent est un corps ferromagnétique qui, une fois aimanté, conserve un état très ordonné des moments magnétiques atomiques.



⇒ Phénomène d'aimantation

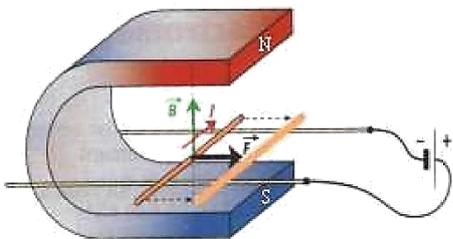


L'aimantation d'un clou

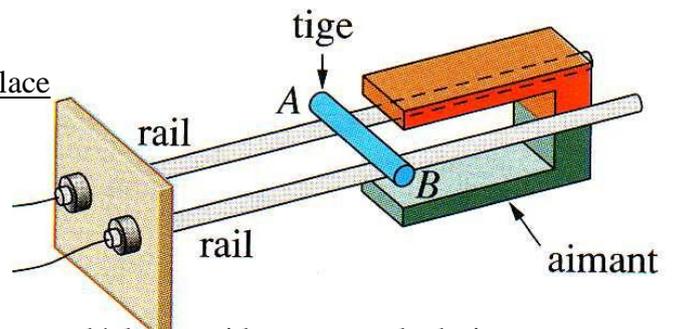


Les moments magnétiques des atomes du clou s'ordonnent parallèlement à l'excitation magnétique. Le clou s'aimante, il produit alors lui aussi son propre champ magnétique. Des pôles nord et sud sont apparus sur le clou, il y a attraction magnétique..

⇒ L'interaction électromagnétique



Rails de Laplace



Quand il est parcouru par un courant, le conducteur se déplace rapidement vers la droite. Le conducteur est soumis à une force qui est créée par l'interaction du champ magnétique et du courant.

Cette force est appelée force électromagnétique ou force de Laplace.

On permute le champ de l'aimant ou on inverse le sens de circulation du courant dans le conducteur; On observe que celui-ci se déplace vers la gauche.

Le sens de la force électromagnétique dépend des sens respectifs du champ magnétique et du courant.

• **Également à portée infinie, la force électromagnétique est bien plus puissante que la gravitation ; on lui doit les orages, elle véhicule l'électricité et au niveau atomique, elle lie les électrons au noyau, elle est à la base des interactions qui donnent naissance aux molécules.....**

1.3.3. Interactions forte et faible

Les forces faible et forte ont une portée très limitée et sont confinées dans le noyau des atomes.

⇒ L'interaction faible

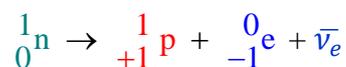
• **Elle est moins puissante que l'interaction forte et la force électromagnétique, mais beaucoup plus puissante que la gravité.**

Elle peut être attractive ou répulsive, agit sur toutes les particules et provoque la dissociation de certains noyaux.

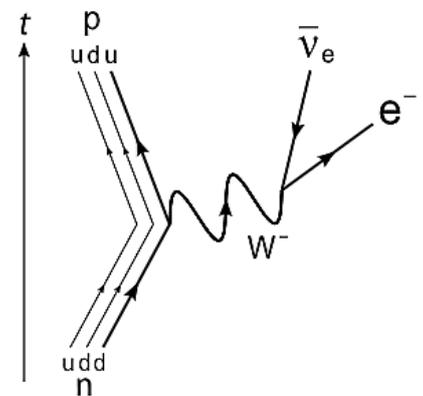
Elle est responsable de la désintégration radioactive de particules subatomiques et est à l'origine de la fusion nucléaire dans les étoiles.

L'effet le plus connu est la « radioactivité β ». La plupart des particules sont sujettes à la désintégration causée par l'interaction faible. C'est la seule interaction fondamentale capable de changer la saveur des quarks.

Exemple de radioactivité « β^- » : ${}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_{+1}\text{p} + \text{W}^-$



Voir le diagramme de Feynman ci-contre d'une désintégration β d'un neutron en un proton, un électron et un anti-neutrino électronique, via un boson W^- .



En 1968, les interactions électromagnétique et faible ont été unifiées, et présentées comme deux aspects de « **l'interaction électrofaible** ».

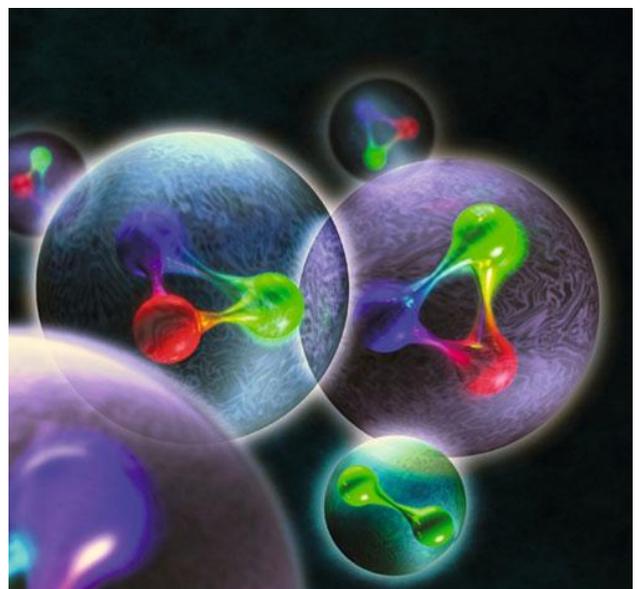
⇒ L'interaction forte

Elle assure la cohésion du noyau, empêchant notamment les protons de s'éloigner par répulsion électrique. L'interaction forte s'applique aux quarks et uniquement aux quarks.

Ses effets se font donc sentir entre particules composées de quarks (les hadrons), comme les protons, les neutrons ... Les électrons, neutrinos ou photons ne sont pas des quarks et sont insensibles à l'interaction forte.

En fait, un quark est défini comme étant une particule sensible à l'interaction forte ...

Tout comme l'interaction électromagnétique agit entre particules possédant une charge électrique, l'interaction forte agit entre particules possédant une charge de « couleur » (d'où le nom de chromodynamique). Les quarks sont les particules qui possèdent une charge de « couleur », les autres (comme les électrons, neutrinos ou photons) sont neutres en ce qui concerne la « couleur ».



Cette charge peut prendre trois valeurs distinctes appelées « rouge », « vert » ou « bleu ». Un proton ou un neutron contient trois quarks, un « rouge », un « vert » et un « bleu », on dit donc qu'il est « blanc ». Les mots « couleur », « rouge », « vert », « bleu » ou « blanc » font référence à des notions mathématiques complexes et sont utilisés uniquement par analogie à la décomposition de la lumière visible en trois couleurs primaires.

- **L'interaction forte est la plus puissante des quatre interactions fondamentales.**

1.4. Cohésion du noyau, stabilité

1.4.1. La Radioactivité naturelle



- [Bref historique](#)

La radioactivité n'a pas été inventée par l'homme. Elle a été découverte, il y a un peu plus d'un siècle, en 1896, par le physicien français **Henri Becquerel**. Ce dernier cherchait à savoir si les rayons qu'émettaient les sels fluorescents d'uranium étaient les mêmes que les rayons X découverts en 1895 par **Wilhelm Roentgen**, physicien allemand. Il pensait que les sels d'uranium, après avoir été excités par la lumière, émettaient ces rayons X. Quelle ne fut pas sa surprise lorsqu'à Paris, en mars 1896, il découvrit que le film photographique avait été impressionné sans avoir été exposé à la lumière du soleil ! Il en conclut que l'uranium émettait spontanément et sans s'épuiser des rayonnements invisibles, différents des rayons X. Le phénomène découvert est appelé radioactivité (du latin radius : rayon). À la suite des travaux d'Henri Becquerel, **Pierre et Marie Curie** isolèrent en 1898 le polonium et le radium, des éléments radioactifs inconnus présents dans le minerai d'uranium.

La radioactivité : Revue thématique du CEA janvier 2002

- [La radioactivité naturelle](#)

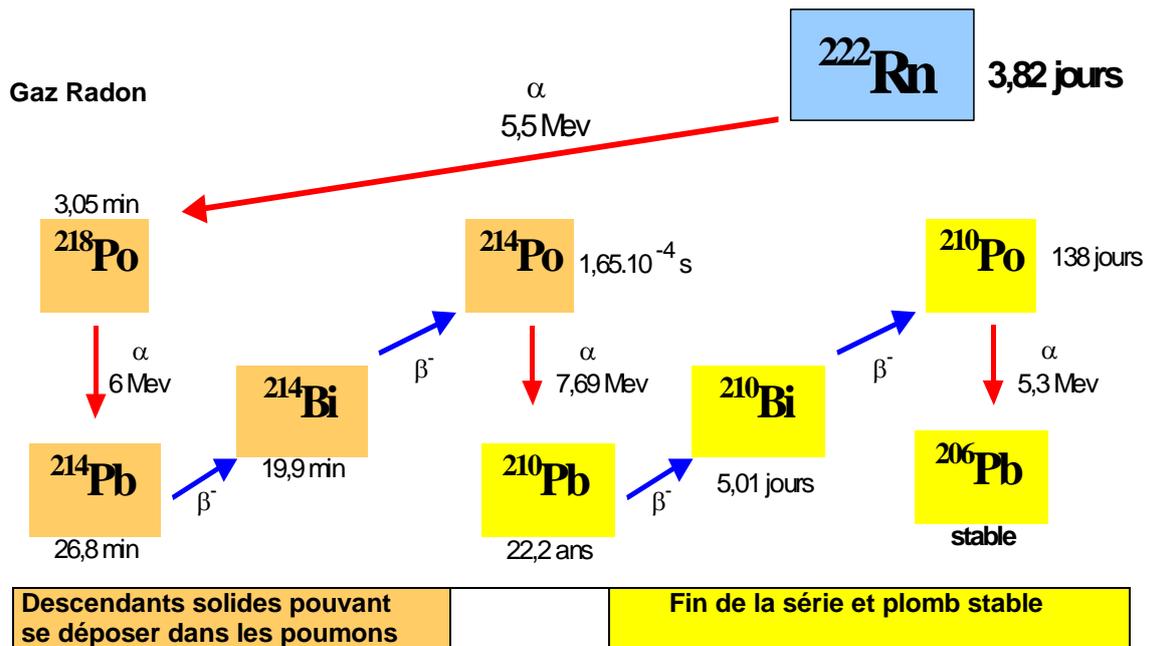
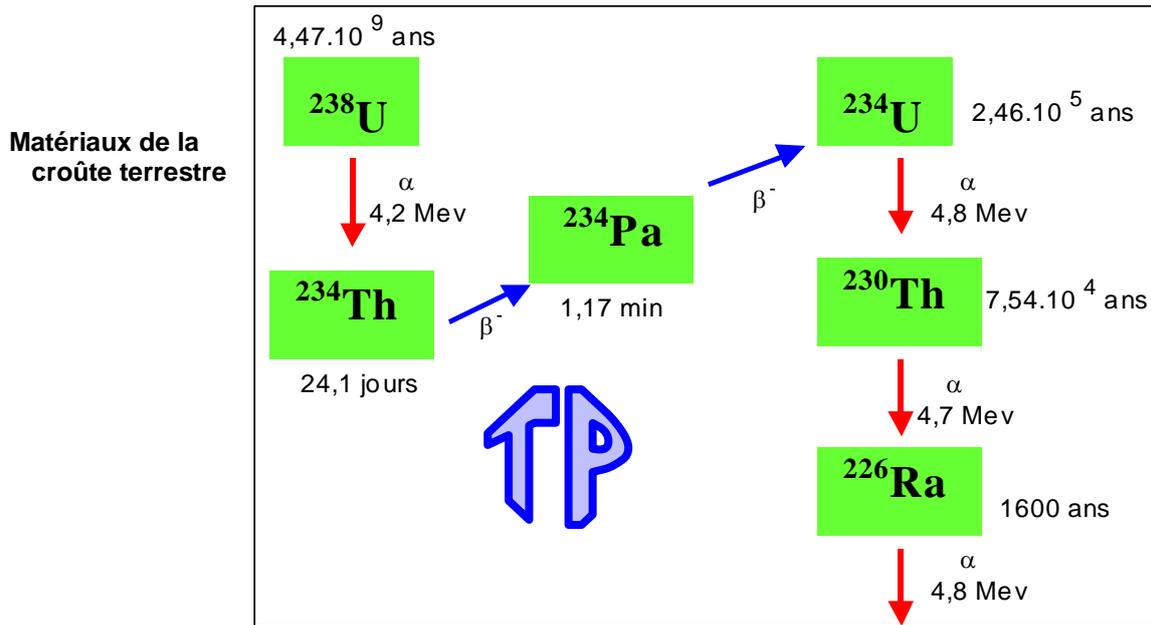
Dans la nature, la plupart des noyaux d'atomes sont « stables ».

Cependant, **certains atomes ont des noyaux instables**, ce qui est **dû à un excès soit de protons, soit de neutrons, ou encore à un excès des deux**. Ils **sont** dits **radioactifs** et sont appelés **radio-isotopes** ou **radionucléides**.

Les noyaux d'atomes radioactifs se transforment spontanément en d'autres noyaux d'atomes, radioactifs ou non. Cette transformation irréversible d'un atome radioactif en un autre atome est appelée **désintégration** ou **transmutation** et s'accompagne d'une **émission** de différents types de **rayonnements**.

Exemples :

- De noyaux radioactifs en noyaux radioactifs, l'uranium 238 tend à se transformer en une forme stable, le plomb 206.



- L'isotope 12 du carbone « $^{12}_6\text{C}$ » n'est pas radioactif, l'isotope 14, « $^{14}_6\text{C}$ » l'est.

- L'hydrogène possède 3 isotopes qui ont 0, 1 ou 2 neutrons.



(Un élément chimique peut avoir à la fois des isotopes radioactifs et des isotopes non radioactifs).

Définition : Sont « isotopes » des atomes ayant le même nombre de protons et un nombre différent de neutrons. Ils appartiennent au même élément chimique.

Exemple : Le carbone 12 « $^{12}_6\text{C}$ » (six neutrons) et le carbone 14 « $^{14}_6\text{C}$ » (huit neutrons) sont deux isotopes du carbone.

La table périodique des éléments de Mendeleïev permet de classer et de nommer les différents éléments chimiques découverts à ce jour par nombre de protons dans le noyau, allant de 1 pour l'hydrogène à 92 pour l'uranium, et même plus pour des noyaux n'existant pas à l'état naturel et fabriqués en laboratoire. Elle spécifie les propriétés chimiques des éléments qui dépendent du nombre d'électrons de l'atome.

Le tableau périodique est classé par état physique et propriétés chimiques. Les légendes indiquent :

- État solide (rouge)
- État liquide (bleu)
- État gazeux (jaune)
- État artificiel (gris)

Les propriétés chimiques sont classées en familles :

- Non-métaux (vert)
- Métaux alcalins (orange)
- Métaux alcalino-terreux (bleu clair)
- Métaux de transition (bleu foncé)
- Lanthanides (bleu très foncé)
- Actinides (bleu très foncé)
- Métaux pauvres (bleu très foncé)
- Halogènes (jaune)
- Gas rares (bleu très foncé)

Le tableau principal liste les éléments de l'hydrogène (H) au radon (Rn) et les éléments synthétiques jusqu'à l'ununquadium (Uuq).

Remarque : La radioactivité ne concernant que le noyau et non les électrons, les propriétés chimiques des isotopes radioactifs sont les mêmes que celles des isotopes stables.

▪ Les radio-isotopes naturels

Lors de la formation de la Terre, il y a environ 5 milliards d'années, la matière comprenait des atomes stables et instables. Mais depuis, la majorité des atomes instables se sont désintégrés par radioactivité et la plupart d'entre eux ont fini par atteindre la stabilité. Cependant, il existe toujours quelques atomes radioactifs naturels comme :



- Le granite : 1000 becquerels par kg.
- Le corps humain: un individu de 70 kg a une activité de l'ordre de 8000 becquerels dont environ 5000 becquerels dus au potassium 40 (dans les os).
- Le lait : 80 becquerels par litre.
- L'eau de mer: 10 becquerels par litre.



Définition : La « **demi-vie** ou **période radioactive** » est la durée nécessaire pour que la moitié des atomes radioactifs d'un échantillon soit désintégrée.

- **Les Les radio-isotopes** caractérisés par une **très longue demi-vie** comme l'uranium 238 (4,5 milliards d'années) et le potassium 40 (1,3 milliard d'années). Ils n'ont pas encore eu le temps de tous se désintégrer depuis qu'ils ont été créés ;
- **Les descendants radioactifs** des précédents comme le radium 226 qui est en permanence régénéré après désintégration de l'uranium 238. Le radium 226 se transforme lentement en un gaz lui-même radioactif, le radon 222 ;
- **Les radio-isotopes créés par l'action des rayonnements** sur certains noyaux d'atomes. C'est le cas, par exemple, du carbone 14 qui se forme en permanence dans l'atmosphère.

Ces radio-isotopes naturels sont présents sur toute la planète, dans l'atmosphère (carbone 14, radon 222), dans la croûte terrestre (uranium 238 et uranium 235, radium 226 ...) et dans notre alimentation (potassium 40).

PÉRIODES DE QUELQUES CORPS RADIOACTIFS

ÉLÉMENTS CHIMIQUES	PÉRIODE RADIOACTIVE	ORIGINE	PRÉSENCE	EXEMPLES D'UTILISATION
Tritium	12,3 ans	Artificielle	–	Fusion thermonucléaire Marquage biologique
Carbone 11	20,4 minutes	Artificielle	–	Imagerie médicale
Carbone 14	5 730 ans	Naturelle	Atmosphère Composés carbonés	Datation
Oxygène 15	2,02 minutes	Artificielle	–	Imagerie médicale
Phosphore 32	14,3 jours	Artificielle	–	Recherche en biologie
Soufre 35	87,4 jours	Artificielle	–	Recherche en biologie
Potassium 40	1,3 milliard d'années	Naturelle	Roches riches en potassium, squelette	–
Cobalt 60	5,27 ans	Artificielle	–	Radiothérapie Irradiation industrielle Gammagraphie
Strontium 90	28,8 ans	Artificielle	Produit des réacteurs nucléaires	Jauges d'épaisseur
Iode 123	13,2 heures	Artificielle	–	Médecine nucléaire
Iode 131	8,05 jours	Artificielle	Produit des réacteurs nucléaires	–
Césium 137	30,2 ans	Artificielle	Produit des réacteurs nucléaires	Curiothérapie
Thallium 201	3,04 jours	Artificielle	–	Médecine nucléaire
Radon 222	3,82 jours	Naturelle	Gaz s'échappant des roches granitiques	–
Radium 226	1 600 ans	Naturelle	Roches terrestres contenant de l'uranium	–
Thorium 232	14 milliards d'années	Naturelle	–	Datation des minéraux Combustible potentiel
Uranium 235	704 millions d'années	Naturelle	Certaines roches terrestres Roches granitiques	Dissuasion nucléaire Combustible
Uranium 238	4,47 milliards d'années	Naturelle	Certaines roches terrestres Roches granitiques	Combustible dans les réacteurs à neutrons rapides
Plutonium 239	24 100 ans	Artificielle	Produit des réacteurs nucléaires	Dissuasion nucléaire Combustible

▪ [Les radio-isotopes artificiels](#)

La **production de radio-isotopes artificiels** se fait au moyen d'un cyclotron ou d'un réacteur nucléaire et permet de nombreuses applications. Certains radio-isotopes (cobalt 60, iridium 192 ...) peuvent être utilisés comme source de rayonnements pour des radiographies gamma (ou gammagraphies) ou comme source d'irradiation pour la radiothérapie ou pour des applications industrielles. De telles sources sont

couramment utilisées en médecine et dans l'industrie. D'autres radio-isotopes artificiels sont créés dans les réacteurs nucléaires (strontium 90, césium 137...).

Certains ne sont pas utilisés par l'homme. Ils constituent ce que l'on appelle **les déchets nucléaires**. Fortement radioactifs, ils doivent être stockés sous haute surveillance et isolés de l'homme.



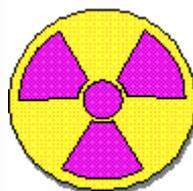
Aphrodite accroupie, exposée au département des antiquités grecques, étrusques et romaines du musée du Louvre. La gammagraphie a permis de mettre en évidence les consolidations antérieures de cette statue de marbre et de situer avec précision inserts métalliques et cavités.

Définition : La « radioactivité » est la désintégration spontanée, aléatoire et inéluctable, de certains noyaux appelés des « radio-éléments ».

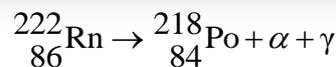
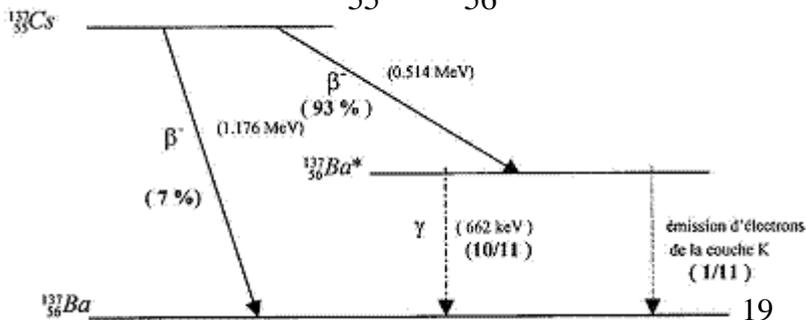
Pour seulement près de 110 éléments chimiques, il y a :
 ≈ 350 nucléides naturels (dont ~ 60 instables),
 ≈ 1500 nucléides artificiels (tous instables).

- spontanée, aléatoire et inéluctable aléatoire

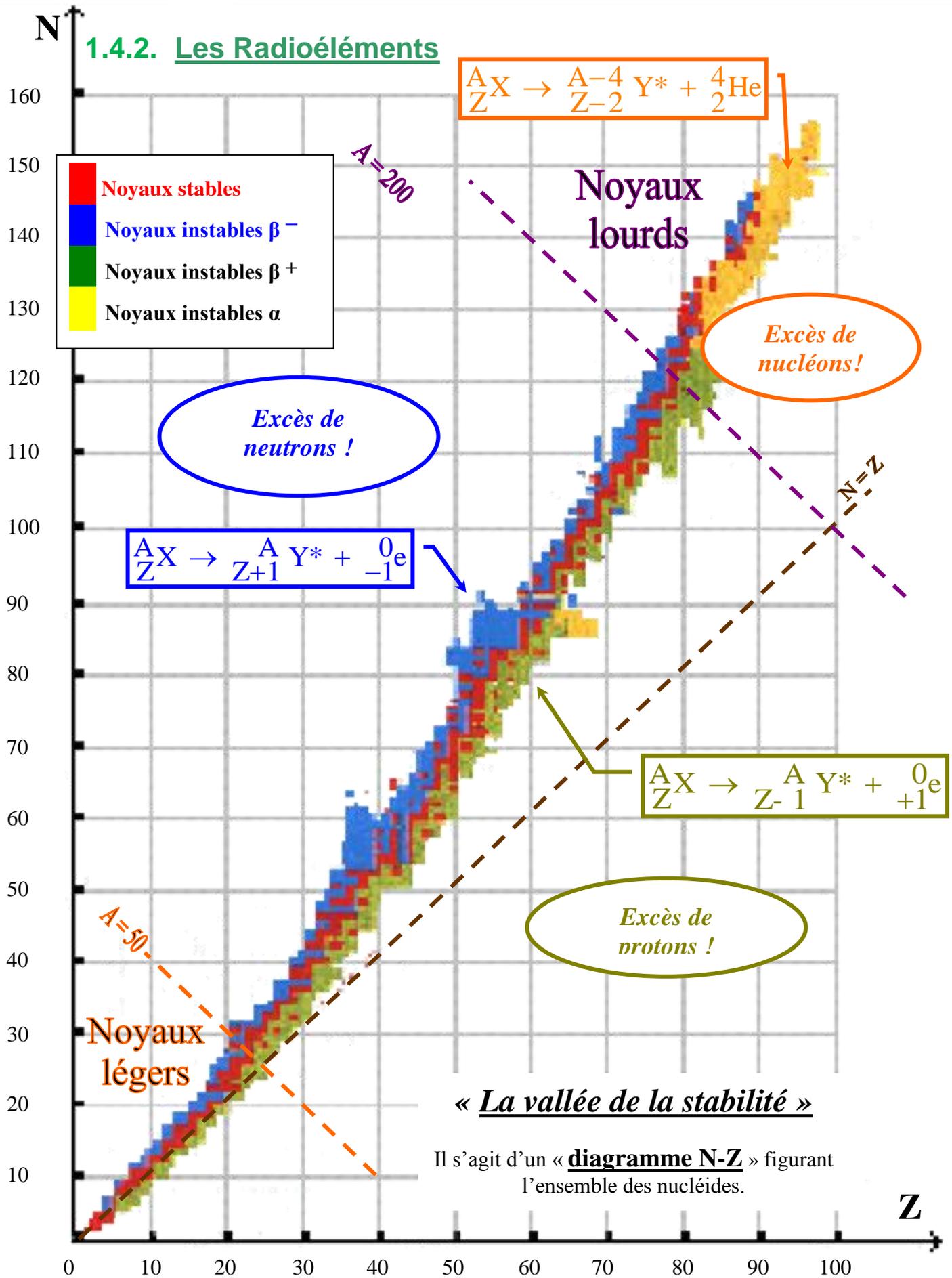
Seule l'observation d'un échantillon renfermant un très grand nombre de noyaux radioactifs, permet une description statistique du comportement des noyaux (Voir TP « C.R.A.B. ») :



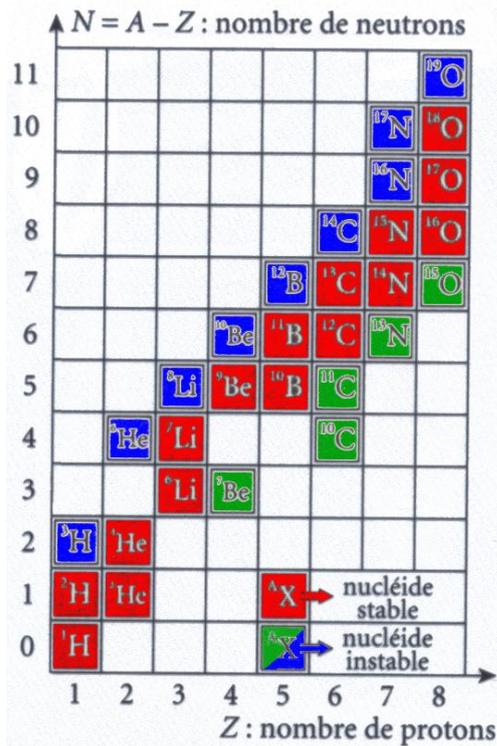
TP



1.4.2. Les Radioéléments



Il s'agit d'un « diagramme N-Z » figurant l'ensemble des nucléides.



Zoom sur Les quelques premiers nucléides

Exemple : Numéro atomique **Z = 6**, le **Carbone** avec ses 6 protons « p+ ».

- $^{12}_6\text{C}$ et $^{13}_6\text{C}$ sont stables avec respectivement 6 et 7 neutrons « n ».
- $^{10}_6\text{C}$ et $^{11}_6\text{C}$ sont émetteurs β^+ avec respectivement 4 et 5 neutrons « n ».
- $^{14}_6\text{C}$ est émetteur β^- avec 8 neutrons « n ».

1.4.3. Les rayonnements radioactifs

⇒ **Les lois de Soddy**

Lors d'une désintégration radioactive, il y a conservation des nombres de masse A et charge Z de sorte que :

$${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}\text{Y}_1 + {}^{A_2}_{Z_2}\text{Y}_2 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} A = A_1 + A_2 \\ Z = Z_1 + Z_2 \end{cases}$$

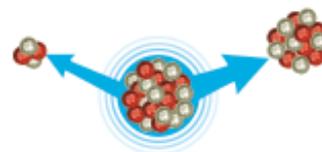
Remarque : X est le noyau père, Y₁ et Y₂ sont les noyaux fils voire plus simplement des particules élémentaires. Les noyaux fils sont créés dans un état excité d'énergie. On le note Y*.

⇒ **Les rayonnements**

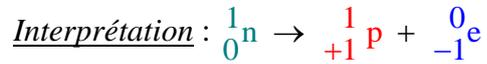
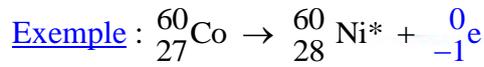
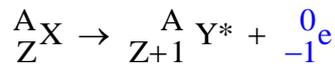
⇒ **de type α :** (α est un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$)

$${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}^* + {}^4_2\text{He}$$

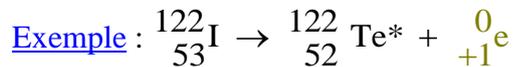
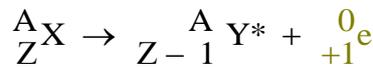
Exemple : ${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po}^* + {}^4_2\text{He}$



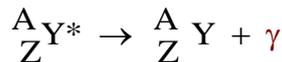
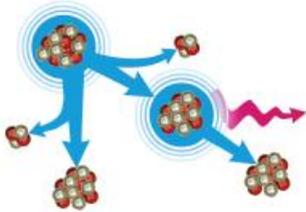
⇒ de type β^- : (β^- est un électron ${}^0_{-1}e$)



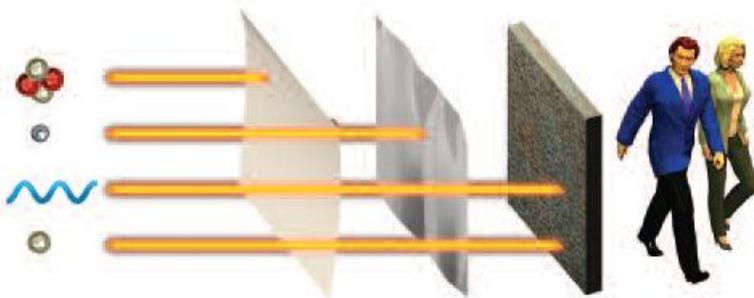
⇒ de type β^+ : (β^+ est un positon ${}^0_{+1}e$)



⇒ de type γ : (γ est un rayonnement électromagnétique, rayonnement lumineux de très haute énergie)



⇒ Pénétration des rayonnements ionisants



• **Particules bêta plus : positon.** Très brefs puisqu'au contact de la matière, ${}^0_{+1}e + {}^0_{-1}e \rightarrow 2\gamma$.

- **Particules alpha.** Pénétration très faible dans l'air. Une simple feuille de papier est suffisante pour arrêter les noyaux d'hélium qui constituent les particules alpha.
- **Particules bêta moins : électrons.** Pénétration faible. Parcourent quelques mètres dans l'air. Une feuille d'aluminium de quelques millimètres peut arrêter les électrons.
- **Rayonnements gamma.** Pénétration très grande, fonction de l'énergie du rayonnement : plusieurs centaines de mètres dans l'air. Une forte épaisseur de béton ou de plomb permet de s'en protéger.

1.5. La décroissance radioactive

1.5.1. « Mourir sans vieillir »

La désintégration des noyaux est **aléatoire** : il est impossible de savoir à quel moment se désintègre un noyau et combien de noyaux d'un échantillon se désintègrent.

Les noyaux radioactifs qui constituent une population étudiée ont tous la même probabilité de disparaître. Cette probabilité est constante et ne dépend pas du passé du noyau ni de la présence éventuelle d'autres noyaux.

Ils peuvent disparaître à chaque instant, indépendamment les uns des autres, ce phénomène est appelé « **mourir sans vieillir** ».



À partir d'un grand nombre de mesures, on peut cependant déterminer le **nombre moyen** \bar{n} de désintégrations pendant l'intervalle de temps Δt :

$\bar{n} = |N(t + \Delta t) - N(t)| = -\Delta N(t)$ où $N(t)$ est le nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant t .

Pendant la durée Δt , la variation $\Delta N(t)$ du nombre de noyaux est approximativement proportionnelle à Δt et à $N(t)$:

$$\Delta N(t) \approx -\lambda N(t) \Delta t \quad (\lambda > 0)$$

Le réel λ ne dépend pas du temps : c'est une mort sans vieillissement.

$\frac{\Delta N(t)}{\Delta t}$, « **la vitesse moyenne de variation du nombre d'atomes** » vérifie :

$$\frac{\Delta N(t)}{\Delta t} \approx -\lambda N(t)$$

1.5.2. Évolution temporelle d'un échantillon d'atomes radioactifs

Un noyau ne se désintègre qu'une seule fois, mais le nombre de noyaux d'un échantillon est considérable (une mole = $6,02 \cdot 10^{23}$ atomes). L'émission radioactive s'étale donc dans le temps.

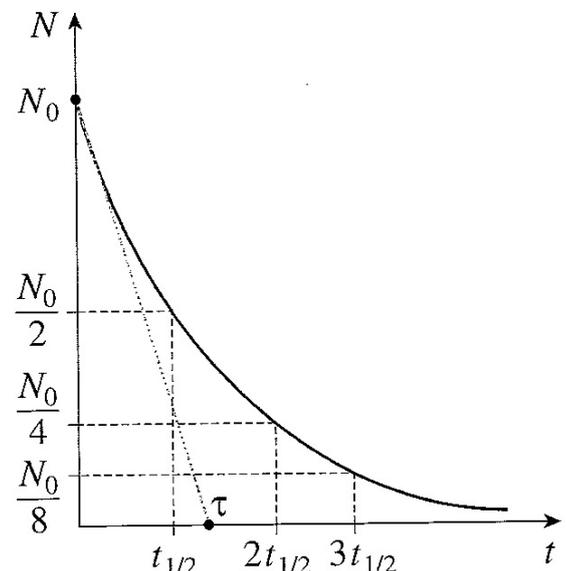
⇒ Loi de décroissance radioactive

On cherche une fonction $N(t)$ qui vérifie l'équation :

$$\Delta N(t) \approx -\lambda N(t) \Delta t \quad (\lambda > 0)$$

Cette fonction $N(t)$, nombre de noyaux radioactifs en fonction du temps, est la « décroissance radioactive » :

N_0 : nombre de noyaux radioactifs à l'instant $t = 0$,



λ : constante radioactive dont la valeur dépend de l'élément étudié (s^{-1}).

⇒ Le temps de demi vie, noté $t_{1/2}$ ou période radioactive T

C'est le temps au bout duquel le nombre de noyaux radioactifs a diminué de moitié.

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$

⇒ Activité d'un échantillon

L'activité de l'échantillon est le nombre moyen de désintégrations par seconde :

$$A = \frac{\bar{n}}{\Delta t} = -\frac{\Delta N}{\Delta t} \quad \text{Soit pour un temps très court } dt :$$

$$A(t) = -\frac{dN}{dt}$$

$$\text{donc } A(t) = \lambda \cdot N(t) \quad \text{et} \quad A_0 = -\lambda N_0$$

A : activité en becquerel (Bq),

$N(t)$: nombre de noyaux radioactifs à l'instant t ,

dN/dt : la dérivée de N par rapport au temps (c'est le coefficient directeur de la droite tangente à la courbe $N = f(t)$).

$t_{1/2}$ est le temps au bout duquel l'activité, comme le nombre de noyaux radioactifs, a diminué de moitié

1.5.3. Applications

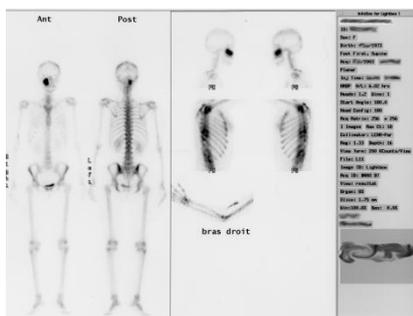
⇒ Les dangers

Ils dépendent de l'activité, de la nature du rayonnement, de la proximité et de la durée de l'exposition au rayonnement radioactif. La nocivité $\gamma > \beta > \alpha$. L'homme vit dans un milieu radioactif : la terre 500 à 5000 Bq, le lait 80 Bq.L⁻¹, l'homme 130 Bq.kg⁻¹, les engrais au phosphates 10⁵ Bq par sac de 50 kg.

⇒ Médecine

Scintigraphie, stérilisation, destruction des tumeurs.

Gamma caméras permettant la captation des rayonnements émis.



Scintigraphie osseuse

⇒ Datation



La méthode de datation au carbone 14 permet de mesurer l'âge des momies avec une précision de quelques décennies.

- La méthode de datation au carbone 14, mise au point il y a une cinquantaine d'années, a complètement bouleversé l'archéologie. Grâce à elle, on a pu dater plus précisément les sites et les dessins rupestres des peuples primitifs européens, à Stonehenge et Lascaux, par exemple.

Cette méthode est utilisée essentiellement pour dater les objets de moins de 40 000 ans, date au-delà de laquelle la détection du carbone 14 devient difficile.

Son principe repose sur l'hypothèse selon laquelle le rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans l'atmosphère est, en première approximation, indépendant du temps. En effet, la quantité de ^{14}C produite (par différentes familles radioactives) est égale à la quantité de ^{14}C désintégrée pendant des durées identiques.

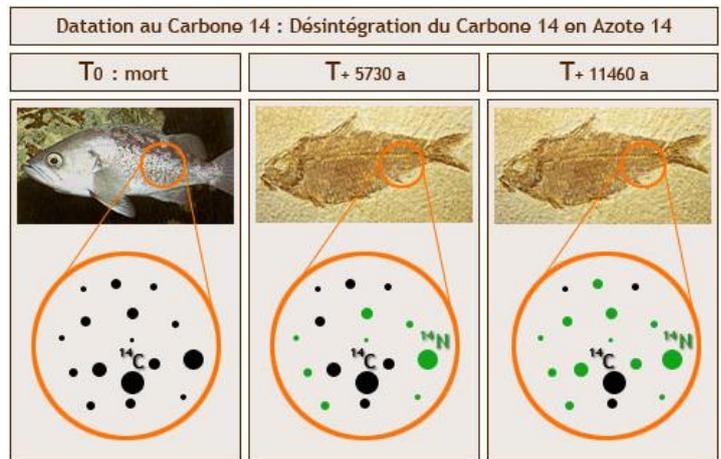
Les organismes fixant le carbone de l'atmosphère lors de leur métabolisme contiennent donc les deux isotopes dans les proportions de celles de l'atmosphère.

Si l'organisme meurt, son métabolisme cesse et le rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ diminue à cause de la décroissance radioactive du ^{14}C .

Une mesure précise de l'activité de l'échantillon permet donc, par comparaison avec un échantillon de référence, de remonter à l'âge de l'organisme.

A_0 activité est l'activité du ^{14}C dans les organismes vivants. L'activité est fixe car le ^{14}C est renouvelé constamment dans l'organisme. À la mort il n'y a plus de renouvellement du ^{14}C , donc $N(^{14}\text{C})$ diminue et l'activité aussi. La mesure de A permet de déterminer t par la relation $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$.

Radioactivité naturelle et artificielle. Activité.



1.6. L'énergie nucléaire : fusion et fission



Parmi les pionniers, on retrouve, de gauche à droite, **Bertrand Goldschmidt**, **Lew Kowarski** et **Frédéric Joliot-Curie**.

- [Bref historique](#)

La matière est constituée d'atomes. En 1912, le physicien anglais **Ernest Rutherford** (qui avait montré que l'atome avait un noyau), et le physicien danois **Niels Bohr** mettent au point un modèle dans lequel **l'atome est constitué d'un noyau de charge positive entouré d'un cortège d'électrons**. En 1913, **Rutherford** découvre le **proton** et en 1932, le physicien anglais **Chadwick** le **neutron**.

En 1938, **Hahn** et **Strassmann** découvrent la **fission spontanée** et le physicien français **Frédéric Joliot-Curie**, assisté de **Lew Kowarski** et **Hans Von Halban**, montre, en 1939, que ce phénomène de cassure des noyaux d'uranium s'accompagne d'un **intense dégagement de chaleur**. La découverte de la réaction en chaîne permettra l'exploitation de l'énergie nucléaire.

Pendant **la guerre de 1939-1945**, les études sur la fission se sont poursuivies aux États-Unis, avec la participation de physiciens émigrés. Le **projet Manhattan** est lancé, avec pour objectif de doter ce pays d'une **arme nucléaire** (qui a été utilisée à **Hiroshima** et à **Nagasaki** en 1945). Dès la fin de la guerre, les recherches sur l'énergie dégagée par la réaction de fission nucléaire sont poursuivies dans le but d'une utilisation civile. En France, en 1945, le **CEA** (Commissariat à l'énergie atomique) est créé sous l'impulsion du **général de Gaulle**. Cet organisme public de recherche est chargé de donner à la France la **maîtrise de l'atome** dans les secteurs de la **recherche**, de la **santé**, de **l'énergie**, de **l'industrie**, de la **sûreté** et de la **défense**.

L'énergie nucléaire : fusion et fission : Revue thématique du CEA janvier 2002

- [La source d'énergie nucléaire](#)

Le noyau de l'atome est un assemblage de protons et de neutrons concentrés dans un très petit volume et soumis à des forces différentes.

Par des techniques très précises, il est possible de mesurer la masse d'un noyau, celle d'un proton isolé ou d'un neutron isolé.

La masse du noyau est inférieure à la somme des masses de chacun de ses nucléons.

Qu'est devenue la masse manquante ?

Cette masse ne disparaît pas mais se transforme en énergie. Selon la formule d'Einstein,

$$E = m.c^2,$$

cette « énergie de liaison » équivalente à la perte de masse sert de ciment pour tenir ensemble les constituants du noyau.

Les atomes les plus liés sont les atomes de masse moyenne. Leur perte de masse est plus grande par nucléon : toutes les transformations de noyaux tendant à produire des noyaux de masse moyenne vont permettre de libérer de l'énergie nucléaire.

Ces transformations sont appelées réactions nucléaires.

1.6.1. Équivalence masse-énergie

Exemple de la désintégration α du radium ${}^{226}_{88}\text{Ra}$:



- Le Radon Rn et la particule α sont émis avec une vitesse ($\approx 20\,000 \text{ km.s}^{-1}$ pour ${}^4_2\text{He}$) : ils possèdent une énergie cinétique ($\frac{1}{2}mv^2$) !

- Un rayonnement électromagnétique γ , paquet d'énergie ($E = \frac{h.c}{\lambda}$) est émis lors de la désexcitation du fils : très haute énergie puisque la longueur d'onde λ est très petite !

⇒ D'où provient l'énergie ?

- Bilan de masse de la désintégration

Définition : L'« unité de masse atomique (u) » est en moyenne, la masse d'un nucléon du carbone 12.

(N_A est la constante d'Avogadro $N_A = 6,022 14 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

$$1u = \frac{m({}^{12}_6\text{C})}{12} = \frac{M({}^{12}_6\text{C})}{12 \cdot N_A} = 1,66 054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

D'où bien entendu :

- $m({}^{12}_6\text{C}) = 12 \text{ u}$, masse d'un atome de carbone 12,
- $m({}^{226}_{88}\text{Ra}) = 225,9770 \text{ u}$, masse d'un atome de radium,
- $m({}^{222}_{86}\text{Rn}) = 221,9703 \text{ u}$, masse d'un atome de radon,
- $m({}^4_2\text{He}) = 4,0015 \text{ u}$, masse d'un atome d'hélium, ...

(Remarque : Les électrons ${}^0_{-1}e$, sont 1860 fois plus légers que les nucléons et sont négligés dans la masse des atomes).

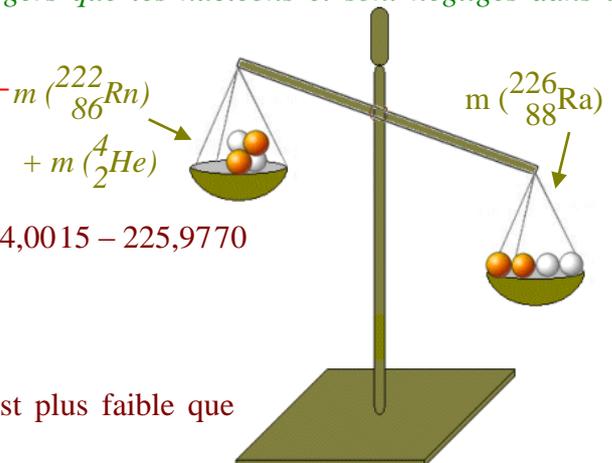
Il vient alors pour ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He} + \gamma$:

$$\Delta m = m({}^{222}_{86}\text{Rn}) + m({}^4_2\text{He}) - m({}^{226}_{88}\text{Ra}) = 221,9703 + 4,0015 - 225,9770$$

$$\Delta m = -0,0052 \text{ u.}$$

Il y donc au cours de cette réaction nucléaire :

- perte de masse Δm , la masse des noyaux fils est plus faible que celle du noyau père !
- la perte de masse est de 0,0023 %.
- ($\Delta m / m({}^{226}_{88}\text{Ra}) = 0,0052 / 225,9770 = 0,000023$).
- Cette perte de masse est à l'origine de l'énergie libérée.



⇒ Le postulat d'Einstein

⇒ 1905 Albert Einstein (25 ans) : Relativité, Espace – temps, équivalence masse – énergie.

Après l'énergie sous forme de chaleur, de lumière, de vitesse ... voici celle sous forme de masse !

Postulat : Un système au repos de masse « m » possède une « énergie de masse ».

$$E = m.c^2. \text{ C'est « l'équivalence masse – énergie ».}$$

Plus précisément, il vaut mieux parler de variation d'énergie ΔE d'un système au repos dont la masse varie de Δm :

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

$m^2 \cdot s^{-2}$: carré de la vitesse de la lumière $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

J ← ← kg

Pour ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He} + \gamma$ où $\Delta m = -0,0052 \text{ u}$ alors :

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = -0,0052 \times 1,66054 \times 10^{-27} \times (3,00 \times 10^8)^2 = -777,13 \times 10^{-15} \text{ J par atome de radium}$$

$$(-4678,3 \times 10^8 \text{ J par mole}).$$

Définition : À l'échelle microscopique, on utilise comme unité d'énergie « l'électron volt (eV) » selon la conversion $1 \text{ eV} = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ J}$, et ses multiples keV, MeV et GeV.

(Remarque : $[eV] = [Q] \times [U] = [I] \times T \times [U] = [U] \times [I] \times T = [P] \times T = [W]$ il s'agit en effet d'une énergie).

$$\text{Pour } {}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He} + \gamma \text{ où } \Delta E = -777,13 \times 10^{-15} \text{ J} = \frac{-777,13 \times 10^{-15}}{1,6022 \times 10^{-19}}$$

$$\Delta E = -485,04 \times 10^4 \text{ eV} = -4,85 \times 10^6 \text{ eV} = -4,85 \text{ MeV}$$

- Cette énergie libérée, équivalente au défaut de masse lors de la désintégration du radium, est communiquée aux noyaux fils sous forme cinétique (${}^{222}_{86}\text{Rn}$ et ${}^4_2\text{He}$) ainsi que dégagée sous forme de rayonnement électromagnétique de très haute énergie (rayonnement γ).
- L'équivalence masse – énergie

Au niveau microscopique, masse et énergie sont confondues. On substitue fréquemment aux masses des particules élémentaires, leurs équivalents énergétiques. On passe des unes aux autres (u en eV), en multipliant la masse par 931,5 MeV :

$$E(1u) = 1,66054 \times 10^{-27} \times (2,9979 \times 10^8)^2 = 14,924 \times 10^{-11} \text{ J}$$

$$E(1u) = \frac{14,924 \times 10^{-11}}{1,6022 \times 10^{-19}}$$

$$E(1u) = 931,5 \text{ MeV}$$

Ainsi :

		proton ${}^1_1\text{p}$	neutron ${}^1_0\text{n}$	électron ${}^0_{-1}\text{e}$	Noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$
Masse (u)	1	1,007277	1,008665	0,00055	4,001506
Énergie de masse (MeV)	931,5	938,2785	939,5714	0,512325	3727,40

On remarque que proton et neutron sont plus lourds que l'unité de masse !
Il arrive par ailleurs que la masse soit exprimée en MeV/c² : 1 u = 931,5 MeV/c²



1.6.2. Énergie de liaison

Définition : « L'énergie de liaison E_L » est l'énergie qu'il faut fournir à un noyau au repos pour le dissocier en ces différents constituants (nucléons).
Ou encore, l'énergie de liaison correspond à l'énergie que les protons et les neutrons doivent céder pour former un noyau.

Selon le principe d'équivalence – énergie, le défaut de masse obtenu dans le cas d'un noyau correspond à son énergie de liaison.

L'énergie de liaison a pour expression générale :

$$E_L = [m_{\text{constituants}} - m_{\text{noyau}}] \cdot c^2 = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{noyau}}] \cdot c^2$$

Exemples

- du radium ${}^{226}_{88}\text{Ra}$:

$$E_L ({}^{226}_{88}\text{Ra}) = [88 \times 1,007277 + (226 - 88) \times 1,008665 - 225,9770] \times 931,5$$

$$E_L ({}^{226}_{88}\text{Ra}) = [1,859146] \times 931,5 = 1731,79 \text{ MeV}$$

- du radon ${}^{222}_{86}\text{Rn}$:

$$E_L ({}^{222}_{86}\text{Rn}) = [86 \times 1,007277 + (222 - 86) \times 1,008665 - 221,9703] \times 931,5$$

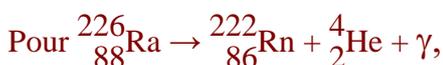
$$E_L ({}^{222}_{86}\text{Rn}) = [1,833962] \times 931,5 = 1708,34 \text{ MeV}$$

- de l'hélium ${}^4_2\text{He}$:

$$E_L ({}^4_2\text{He}) = [2 \times 1,007277 + (4 - 2) \times 1,008665 - 4,0015] \times 931,5$$

$$E_L ({}^4_2\text{He}) = [0,030384] \times 931,5 = 28,3027 \text{ MeV.}$$

Application à la désintégration du radium :



$$E_L(^{226}_{88}\text{Ra}) - E_L(^{222}_{86}\text{Rn}) - E_L(^4_2\text{He}) = -4,8527 \text{ MeV} = \Delta E.$$

- L'énergie libérée au cours de la désintégration correspond à la perte d'énergie de liaison lors du passage du noyau père aux noyaux fils.
- Comme lors de la formation des atomes à partir des particules séparées, la perte d'énergie correspond à une stabilisation de la matière.

*La formation de l'atome conduit à une organisation stable de la matière.
Mais comment apprécier la stabilité d'un noyau ?*

☑ L'énergie de liaison par nucléon

L'énergie de liaison est désormais rapportée au nombre des nucléons du noyau : $\frac{E_L}{A}$.

Exemples

- du radium $^{226}_{88}\text{Ra}$:

$$\frac{E_L(^{226}_{88}\text{Ra})}{A} = \frac{1731,79}{226} = 7,60 \text{ MeV/nucléon.}$$
- du radon $^{222}_{86}\text{Rn}$:

$$\frac{E_L(^{222}_{86}\text{Rn})}{A} = \frac{1708,34}{222} = 7,70 \text{ MeV/nucléon.}$$
- de l'hélium ^4_2He :

$$\frac{E_L(^4_2\text{He})}{A} = \frac{28,3027}{4} = 7,08 \text{ MeV/nucléon.}$$

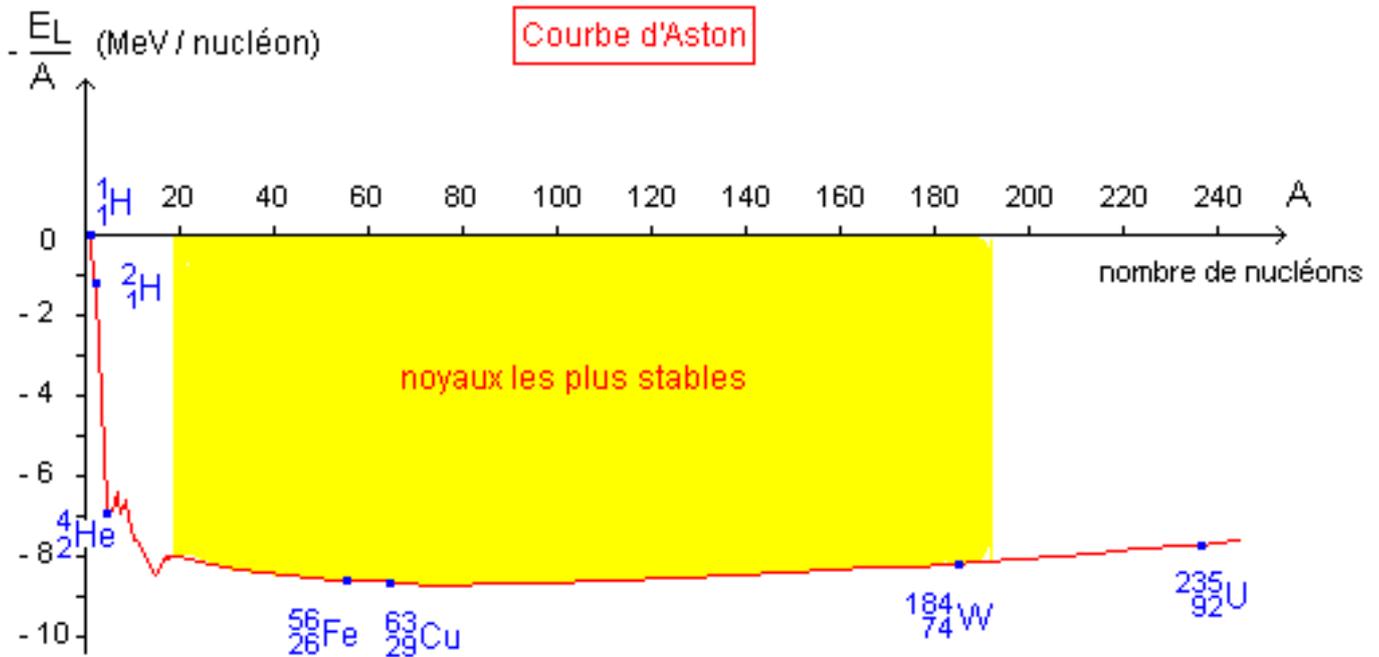
L'énergie de liaison par nucléon « $\frac{E_L}{A}$ » permet de comparer la stabilité des différents noyaux afin de prévoir la nature d'éventuelles réactions nucléaires. Plus cette énergie est grande et plus le noyau est stable. Elle représente ce « ciment » qui crée la cohésion du noyau de l'atome.

On compare les noyaux à partir de la « courbe d'Aston ».

☑ La courbe d'Aston

Les différents nucléides y figurent par nombre de masse croissant.

En ordonnée, il s'agit de « $-\frac{E_L}{A}$ » l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon pour figurer une « cuvette de la stabilité » vers laquelle tendent les noyaux instables.



- Les noyaux les plus liés sont ceux dont l'énergie de liaison par nucléon est la plus élevée (en valeur absolue). Ils sont situés dans la zone centrale (jaune)
- Le noyau de fer 56 est le plus stable car son énergie de liaison par nucléon est la plus élevée.
- Les noyaux les moins liés sont situés aux extrémités de la courbe d'Aston.
- Les réactions de « **fusion nucléaire** » affecteront les **noyaux les plus légers**.
- Les réactions de « **fission nucléaire** » affecteront les **noyaux les plus lourds**.

1.6.3. Fusion et fission nucléaires

⇒ La fusion thermonucléaire

Dans les étoiles

La fusion est le mariage de noyaux légers qui donne naissance à des noyaux plus lourds comme l'hélium, par exemple.

Elle s'accompagne d'une très forte libération d'énergie.

Cette réaction est difficile à réaliser car les forces nucléaires qui lient les nucléons n'agissent qu'à très faible distance alors que la force électrique crée une barrière répulsive qui empêche les noyaux des atomes, qui sont chargés positivement, de s'approcher assez près les uns des autres. Pour passer

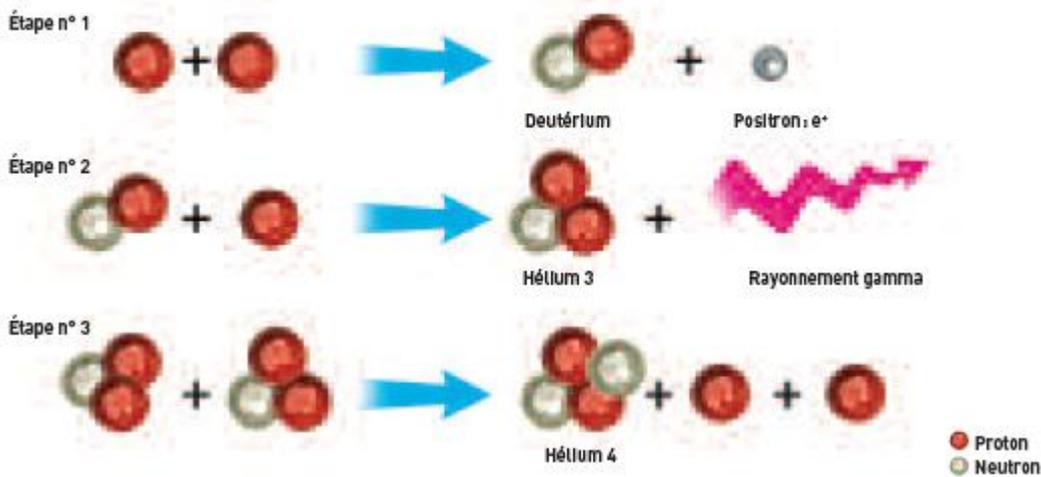


cette barrière, les noyaux doivent se trouver dans un état d'agitation thermique très grand. C'est le cas lorsqu'ils sont portés à très haute température.

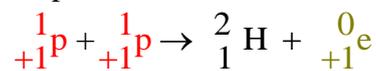
La fusion existe naturellement dans les environnements extrêmement chauds que sont les étoiles comme le Soleil. Il y a, au cœur du Soleil, une température de l'ordre de plusieurs dizaines de millions de degrés qui permet la fusion de noyaux légers comme ceux d'hydrogène en hélium. Ces réactions de fusion thermonucléaire libèrent beaucoup d'énergie et expliquent la très haute température de cet astre qui atteint en surface les 5700 °C. Une très petite partie de l'énergie rayonnée par le Soleil atteint la Terre et permet la vie sur celle-ci. Dans des étoiles plus massives que le Soleil, des températures encore plus hautes permettent la fusion de noyaux plus lourds que ceux de l'hydrogène. Ces réactions produisent, entre autres, des noyaux de carbone, d'oxygène et même de fer au cœur des étoiles les plus chaudes.

L'énergie nucléaire : fusion et fission : Revue thématique du CEA janvier 2002

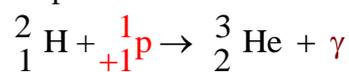
Transformation de l'hydrogène en hélium dans le Soleil



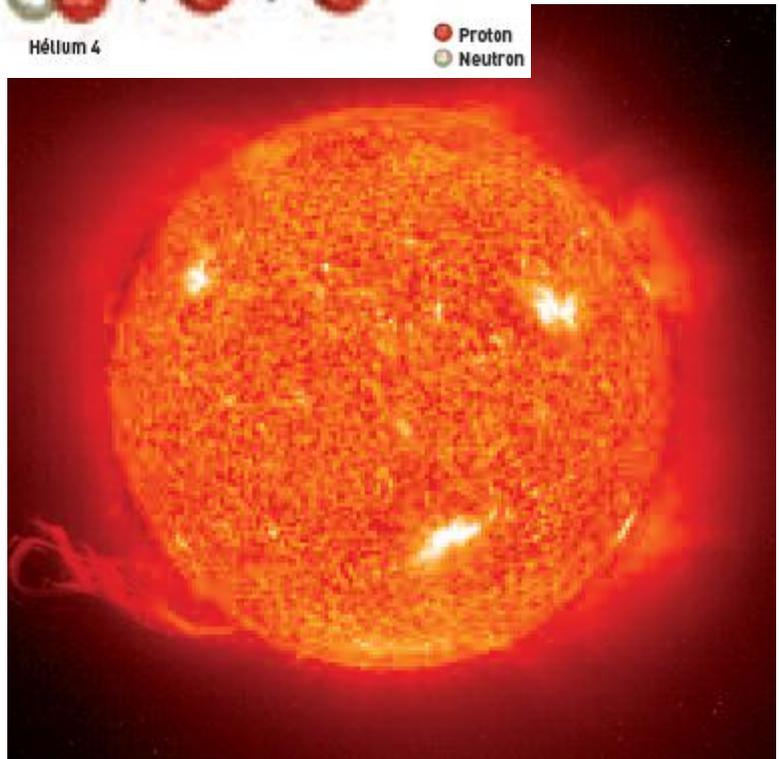
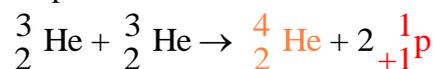
Étape 1 :



Étape 2 :



Étape 3 :



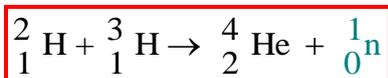
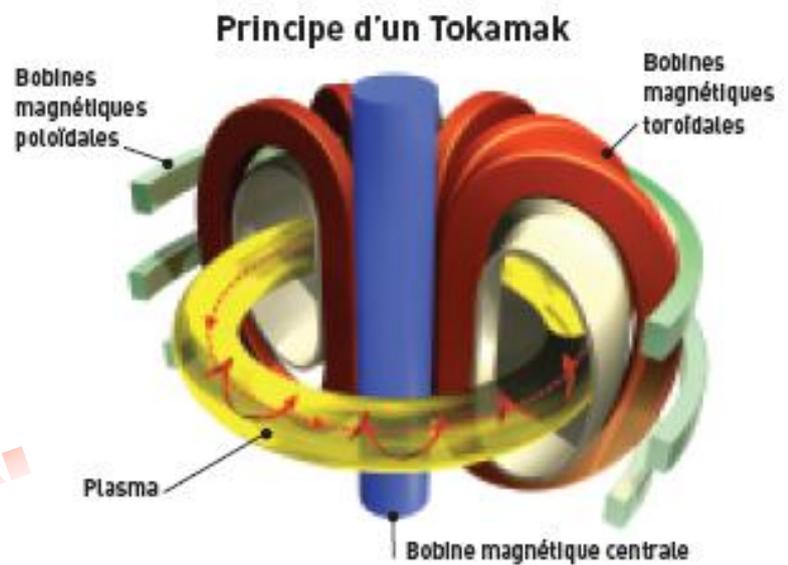
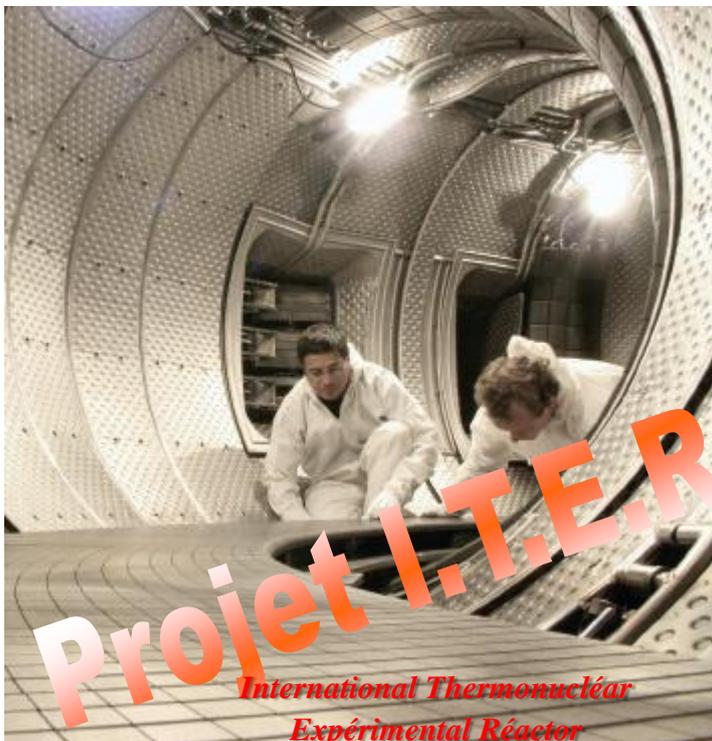
L'homme cherche à maîtriser les réactions de fusion pour récupérer cette fabuleuse énergie. Il a réussi à maîtriser celle-ci dans les bombes nucléaires de type H mais pas encore pour produire de l'électricité.

Pour une application civile de la fusion, la réaction la plus étudiée est la fusion de deux noyaux d'isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium qui fusionnent pour créer un noyau plus lourd, celui de l'hélium. Pour atteindre des températures très élevées et des densités suffisantes de noyaux et pour augmenter la probabilité qu'ils se rencontrent, l'homme se heurte à de nombreuses difficultés techniques.

Deux types d'expériences sont étudiés en laboratoire :

- à faible concentration, le mélange d'isotopes d'hydrogène gazeux (deutérium et tritium) à fusionner peut être renfermé à l'intérieur de parois immatérielles créées par des champs magnétiques. Les noyaux sont portés à plus de 100 millions de degrés dans des machines appelées Tokamak ;
- à forte concentration, le mélange d'isotopes d'hydrogène à fusionner est contenu dans une microbille que l'on irradie très rapidement avec des faisceaux de lasers très puissants

L'énergie nucléaire : fusion et fission : Revue thématique du CEA janvier 2002



$$\Delta m = -1,889 \times 10^{-2} \text{ u,}$$

$\Delta E = -17,6 \text{ MeV.}$ (4,6 fois celle de la fission de l'uranium 235).

*300L d'eau de mer renferment 1 g de Deutérium ;
Le Tritium est fabriqué à partir du lithium.*

Non polluante

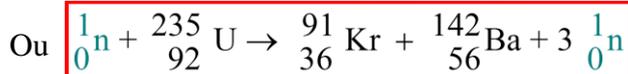
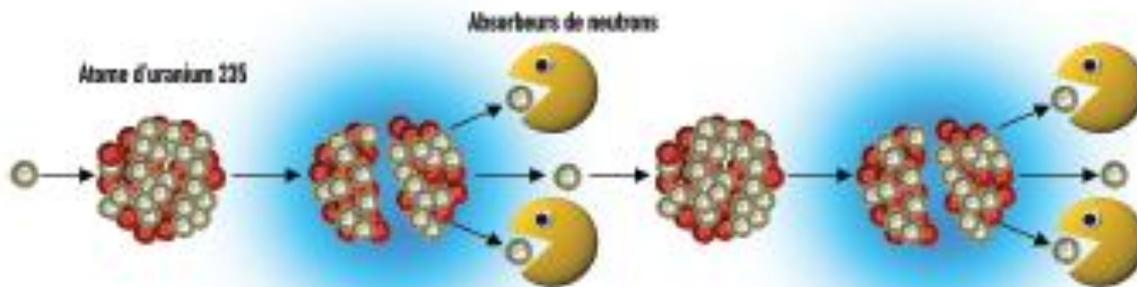
⇒ La fission

La fission est la rupture d'un gros noyau (noyau d'uranium 235, par exemple) qui, sous l'impact d'un neutron, se scinde en deux noyaux plus petits.

La fission s'accompagne d'un grand dégagement d'énergie. Simultanément se produit la libération de deux ou trois neutrons. Les neutrons ainsi libérés peuvent provoquer à leur tour la fission d'autres noyaux et la libération d'autres neutrons, et ainsi de suite... On a une réaction en chaîne puisqu'en induisant une seule fission dans la masse d'uranium, on peut obtenir si on ne contrôle pas les neutrons au moins 2 fissions, qui vont en provoquer 4, puis 8, puis 16, puis 32...

Les deux principales utilisations de la fission sont les **réacteurs nucléaires** et les **bombes nucléaires** de type A. Dans les réacteurs, la réaction en chaîne est stabilisée à un niveau donné, c'est-à-dire qu'une grande partie des neutrons est capturée afin qu'ils ne provoquent pas d'autres fissions. Il suffit seulement qu'un neutron, à chaque fission, provoque une nouvelle fission pour libérer régulièrement de l'énergie. Au contraire, pour la bombe, la réaction en chaîne doit être la plus divergente possible dans le temps le plus court: on favorise sa croissance exponentielle et l'on confine l'énergie le plus longtemps possible. La réalisation d'une bombe nécessite de grandes connaissances technologiques et un matériau fissile très pur.

L'énergie nucléaire : fusion et fission : Revue thématique du CEA janvier 2002



Déchets radioactifs polluants à traiter



1.7. Cohésion des solides

1.7.1. Solide ionique

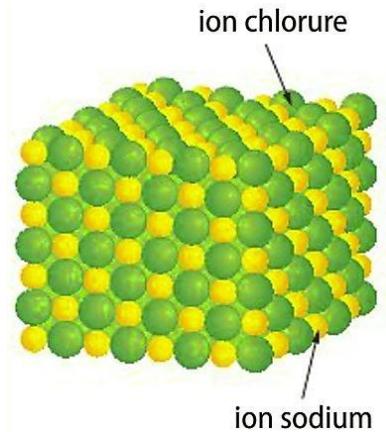
⇒ Description d'un solide ionique : Le sel de cuisine

Le sel de cuisine est constitué de chlorure de sodium de formule NaCl.

Ce solide se dissout facilement dans l'eau, pour former une solution aqueuse ionique contenant les ions chlorure Cl^- et les ions sodium Na^+ . Le solide est, lui aussi, constitué des mêmes ions.

Au début du XXe siècle, l'utilisation des rayons X a permis de mettre en évidence un agencement tridimensionnel régulier des ions chlorure Cl^- et des ions sodium Na^+ sur de longues distances (Figure 1).

On peut décrire cette structure par un empilement de cubes élémentaires. Deux modèles de représentation des cubes élémentaires sont utilisés :



- un modèle compact, où les ions sont assimilés à des sphères rigides (Figure 2a).
- un modèle éclaté, où seul le centre des ions est représenté (Figure 2b).

Figure 1 : L'empilement des ions dans le chlorure de sodium.

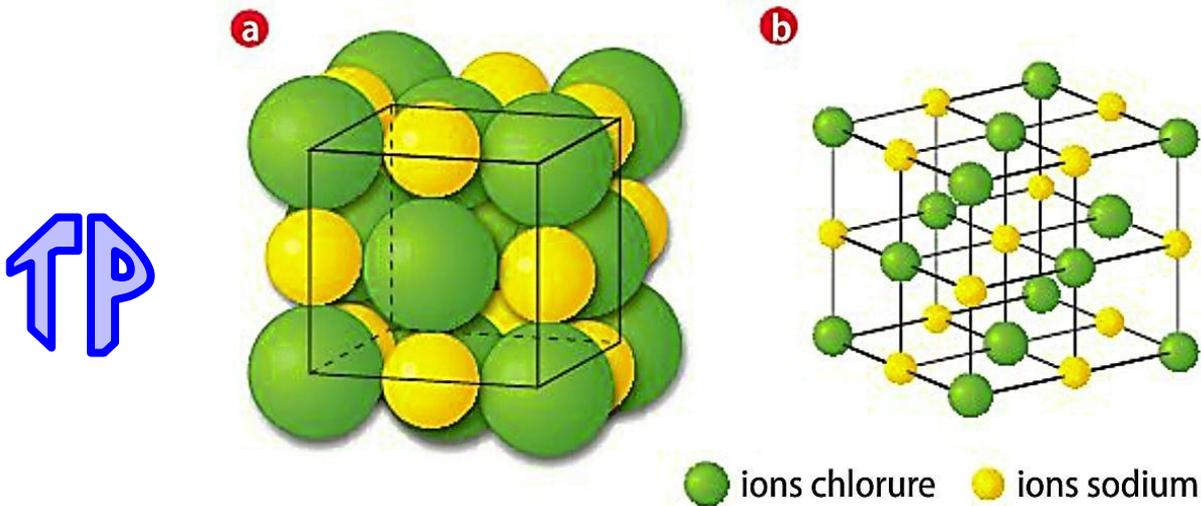


Figure 2 : Modèle compact en a et éclaté en b, d'un cube élémentaire.

• Interactions entre les ions

Tous les ions portent des charges multiples de la charge élémentaire e .

La charge de l'ion sodium est $q_{\text{Na}^+} = e = 1,6 \times 10^{-19}$ C, celle de l'ion chlorure est $q_{\text{Cl}^-} = -e = -1,6 \times 10^{-19}$ C.

Le rayon de l'ion sodium est $r_{\text{Na}^+} = 97$ pm et celui de l'ion chlorure, $r_{\text{Cl}^-} = 181$ pm ($1 \text{ pm} = 10^{-12}$ m).

Les ions sodium et chlorure étant chargés électriquement, on peut calculer l'intensité de la force

s'exerçant entre deux ions A. et B grâce à la loi de Coulomb : $F_{AB} = k \cdot \frac{|q_A \cdot q_B|}{r^2}$

avec r , la distance entre les centres des deux ions, en mètre, q_A et q_B les charges des ions A et B, en coulomb, $k = 9,0 \times 10^9$ S.I. une constante.

- Comparaison des forces coulombiennes

Les ions sodium ne sont pas en contact avec d'autres ions sodium, les ions chlorure ne sont pas en contact avec d'autres ions chlorure : **Les ions chlorure sont les plus proches voisins d'un ion sodium.**

Un ion sodium a six ions chlorure comme voisins directs et Les ions sodium sont les plus proches voisins d'un ion chlorure. Un ion chlorure a six ions sodium comme voisins directs et comme les deux ions sont de signes contraires, ils s'attirent.

La distance « r » entre le centre d'un ion chlorure et le centre d'un ion sodium en contact est :

$$r = r_{\text{Na}^+} + r_{\text{Cl}^-} = 278 \text{ pm} = 2,78 \times 10^{-10} \text{ m.}$$

L'intensité de la force électrostatique $F_{\text{Na}^+/\text{Cl}^-}$ s'exerçant entre un ion chlorure et un ion sodium en contact :

$$F_{\text{Na}^+/\text{Cl}^-} = \frac{k \cdot e \cdot e}{r^2}$$

$$F_{\text{Na}^+/\text{Cl}^-} = \frac{9,0 \times 10^9 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 1,6 \times 10^{-19}}{(2,78 \times 10^{-10})^2} = 3,0 \times 10^{-9} \text{ N.}$$

Sur la figure 2a, la longueur « a » d'une arête du cube en fonction de r_{Na^+} et de r_{Cl^-} vaut $a = 2r$ soit $2r_{\text{Na}^+} + 2r_{\text{Cl}^-}$: $a = 5,56 \times 10^{-10} \text{ m}$. Selon le théorème de Pythagore, la longueur d'une diagonale de face en fonction d'une arête du cube est « $\sqrt{2} a$ » soit « $2\sqrt{2} r$ ». Sur une diagonale, on a deux fois la distance séparant les centres de deux ions chlorure proches. Entre deux centres, on trouve une distance $\sqrt{2} r = 3,93 \times 10^{-10} \text{ m}$. L'intensité de la force électrostatique $F_{\text{Cl}^-/\text{Cl}^-}$ s'exerçant entre un ions chlorures :

$$F_{\text{Cl}^-/\text{Cl}^-} = \frac{k \cdot e \cdot e}{2r^2} = \frac{F_{\text{Na}^+/\text{Cl}^-}}{2} = 1,5 \times 10^{-9} \text{ N.}$$

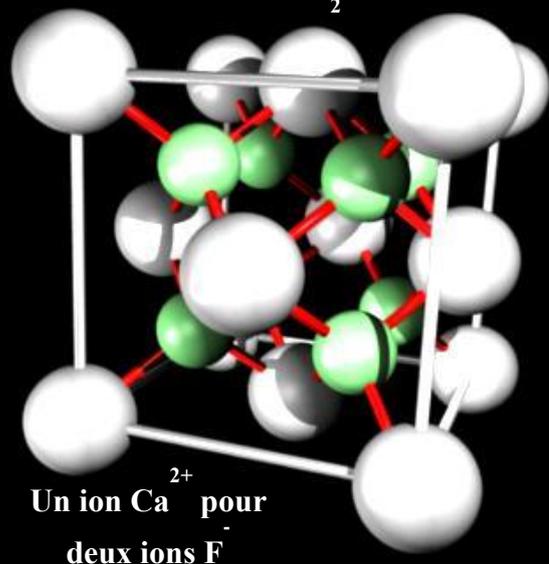
La force s'exerçant entre deux ions chlorure est répulsive car les deux ions ont une charge de même signe, mais cette force a une intensité moins grande que celle s'exerçant entre un ion sodium et un ion chlorure, car la distance entre les deux centres des ions chlorure est plus grande.

Il y a un ensemble de forces attractives d'intensités plus importantes que les forces répulsives. Ceci assure la stabilité et la cohésion de la structure.

Chlorure de sodium NaCl



Fluorure de calcium CaF₂



⇒ Formule d'un solide ionique

La formule statistique d'un solide ionique indique la proportion des ions présents.

Exemple : fluorure de calcium
– Ion fluor, F^- et ion calcium : Ca^{2+}
– Fluorure de calcium : CaF_2

La formule indique le cation suivi de l'anion sans les charges avec en indice le nombre d'ions permettant de respecter la neutralité électrique.

1.7.2. Solide moléculaire

⇒ Électronégativité

Le fait que les molécules ne se déplacent pas toujours librement comme elles le font à l'état gazeux mais qu'elles forment aussi des liquides et des solides, signifie qu'il existe des interactions entre elles. Ainsi, le fait que l'eau soit liquide à la température ambiante est la manifestation que les molécules d'eau adhèrent les unes aux autres. Pour faire bouillir l'eau nous devons apporter suffisamment d'énergie pour écarter les molécules les unes des autres. **Les forces responsables de l'adhérence des molécules sont appelées forces de van der Waals** en référence au scientifique hollandais du dix-neuvième siècle qui les étudia pour la première fois. « **Le parfum de la fraise** », Peter Atkins, Dunod.

Dans une **liaison covalente**, le partage du doublet d'électrons entre deux atomes ne se fait pas toujours de manière symétrique. Tout dépend de **l'électronégativité des atomes**, c'est-à-dire de leur aptitude à attirer les électrons.

Elle augmente de gauche à droite et de bas en haut dans la classification périodique : L'élément le plus électro-négatif est le fluor F

L'électronégativité est l'aptitude d'un atome ou d'un groupe d'atomes, d'une entité moléculaire à attirer des électrons de liaison.

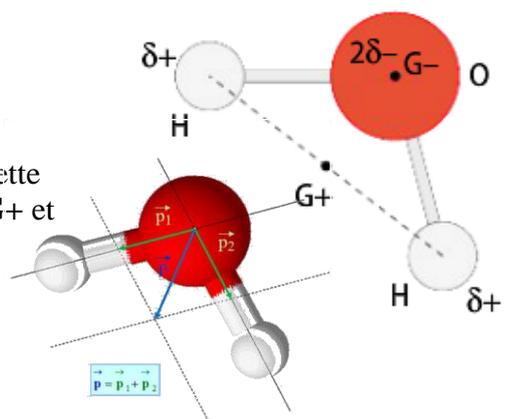
H 2,1							He 0
Li 1,0	Be 1,5	B 2,0	C 2,5	N 3,0	O 3,5	F 4,0	Ne 0
Na 0,9	Mg 1,2	Al 1,5	Si 1,8	P 2,1	S 2,5	Cl 3,0	Ar 0

Échelle d'électronégativité de PAULING pour quelques éléments chimiques
(En unité atomique de moment dipolaire : $1 \text{ u.a.m.d} = 2,54 \text{ Debye}$)

⇒ molécule polaire

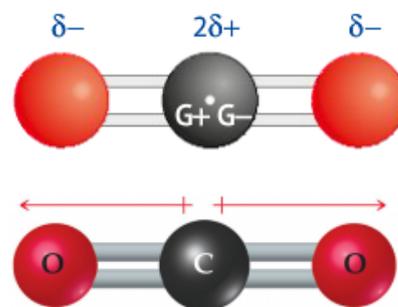
• L'eau H_2O

Les deux liaisons covalentes O-H sont polarisées. Comme cette molécule est coudée, les barycentres des charges positives G^+ et négatives G^- ne coïncident pas et la **molécule est polaire**.



- le dioxyde de carbone CO₂ en contre-exemple

Les deux liaisons covalentes C=O sont polarisées. Comme cette molécule est linéaire, le dipôle résultant est nul. Cette **molécule est donc apolaire**.

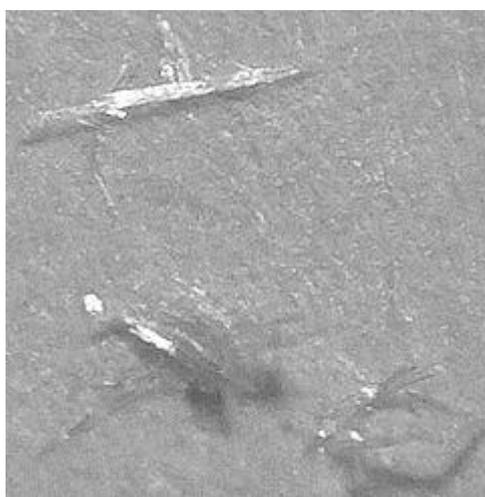


⇒ Cohésion des solides moléculaires

La glace, le diiode I₂, le chlorure d'iode ICl, l'acide benzoïque, le saccharose C₁₂H₂₂O₁₁ sont des solides moléculaires : **Un solide moléculaire est un empilement régulier de molécules dans l'espace.**

La cohésion des solides moléculaires est assurée par deux types d'interactions intermoléculaires :

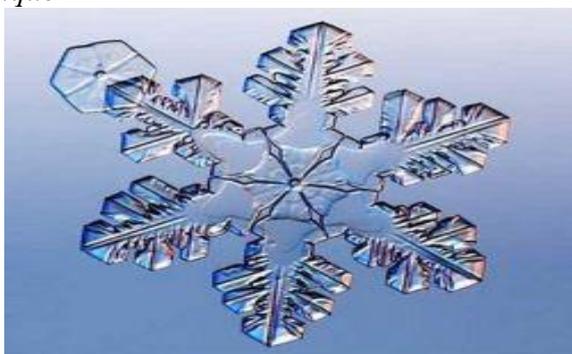
- **Les interactions de Van der Waals ;**
- **Les liaisons hydrogène.**



L'acide benzoïque



le saccharose



La glace

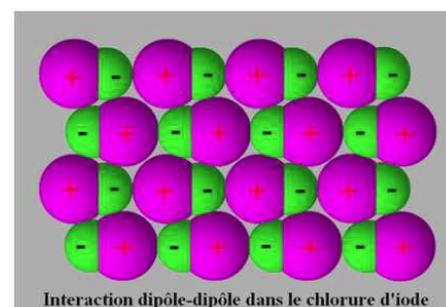


le diiode

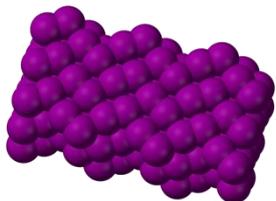
L'énergie mise en jeu dans ces interactions est très inférieure à celle rencontrée dans les cristaux ioniques. **La cohésion des cristaux moléculaires est beaucoup moins forte que celle des cristaux ioniques.**

- Les interactions de Van der Waals

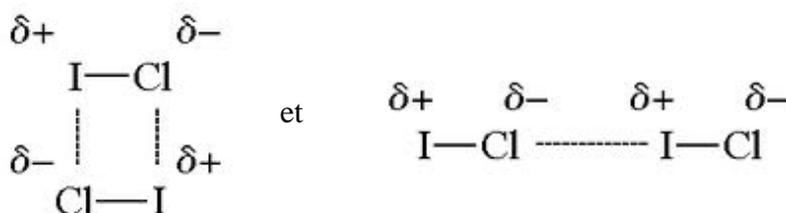
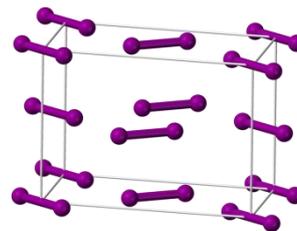
Les interactions de Van der Waals sont des interactions entre dipôles électriques. Ces forces sont d'autant plus intenses que les liaisons internes aux molécules sont polaires et que les molécules qui interagissent sont proches (on parle d'interactions à courtes distances). Ces solides sont constitués de molécules régulièrement disposées dans l'espace.



Dans le cas des molécules polaires, ces interactions électrostatiques entre les dipôles permanents qui assurent la cohésion du solide, sont les **interactions de Van der Waals**.



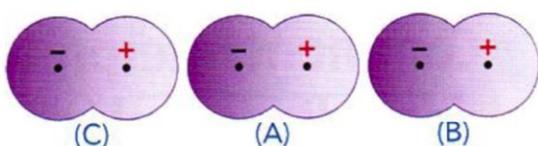
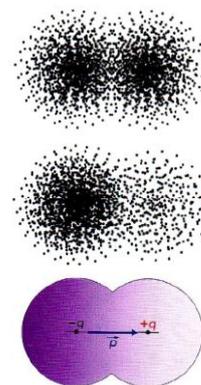
Réseau 3D du diiode à gauche, en vue éclatée à droite



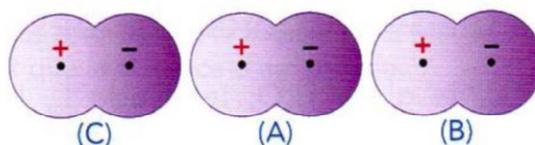
Ces interactions sont plus faibles pour les molécules apolaires.

Dans la molécule de diiode, les électrons n'ont pas de position définie et sont constamment en mouvement autour des noyaux au sein des nuages électroniques. Ainsi, au sein de la molécule de diiode, les électrons se trouvent statistiquement aussi prêt d'un noyau, que de l'autre. **La molécule de diiode est apolaire.**

Par contre à un instant donné, ces électrons peuvent être plus proches de l'un des noyaux : Il se forme alors un dipôle instantané (voir ci-contre). Il en est de même pour toutes les molécules du solide ; Les dipôles instantanés ainsi créés interagissent, ce qui assure la cohésion du cristal de diiode. Ces interactions changent tout le temps, mais leurs effets eux sont permanents.



Polarisation des molécules de diiode dans le cristal de diiode à l'instant t

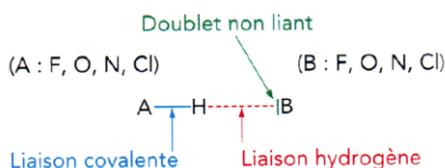


Polarisation des molécules de diiode dans le cristal de diiode à l'instant t'

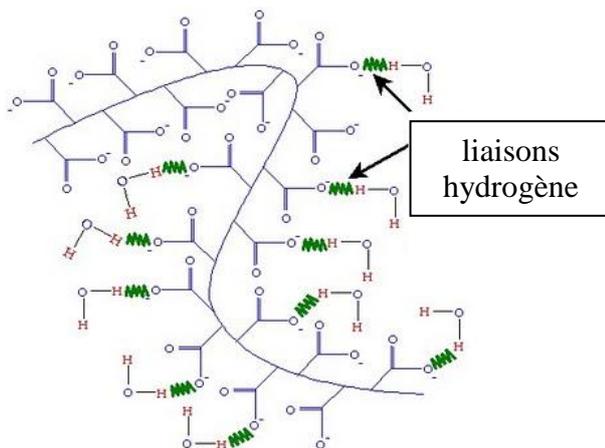
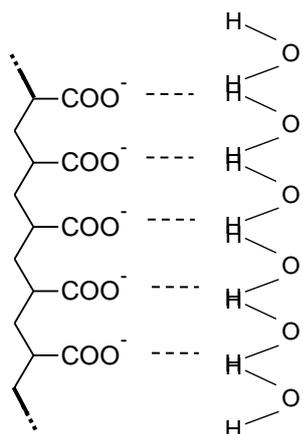
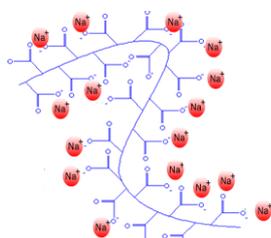
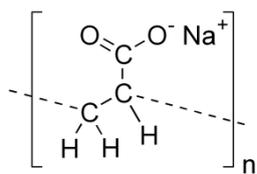
- **La liaison hydrogène**

Des interactions attractives supplémentaires peuvent s'ajouter aux interactions de Van der Waals : ce sont les **liaisons hydrogène**.

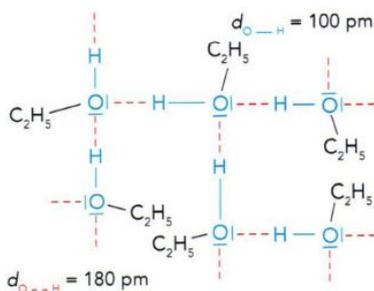
Une liaison hydrogène se forme lorsqu'un atome d'hydrogène, lié à un atome A très électronégatif, interagit avec un atome B, également très électronégatif et porteur d'un doublet non liant (O, N, Cl, F).



Les polymères absorbants (polyacrylates de sodium) sont des polymères capables d'absorber plusieurs centaines de fois leur poids en eau. Ils sont utilisés dans les couches.

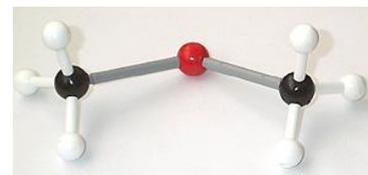


Les liaisons hydrogène peuvent aussi s'établir entre les molécules d'espèces liquides.

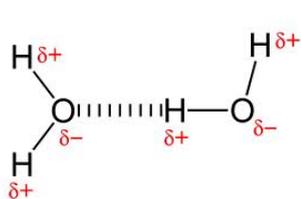


L'éthanol $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ possède des liaisons hydrogène :
 $T_{\text{ébu}}(\text{éthanol}) = 78^\circ\text{C}$.

L'oxyde de diméthyle $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$ (un isomère) n'a pas de liaison hydrogène :
 $T_{\text{ébu}}(\text{méthoxyéthane}) = -25^\circ\text{C}$

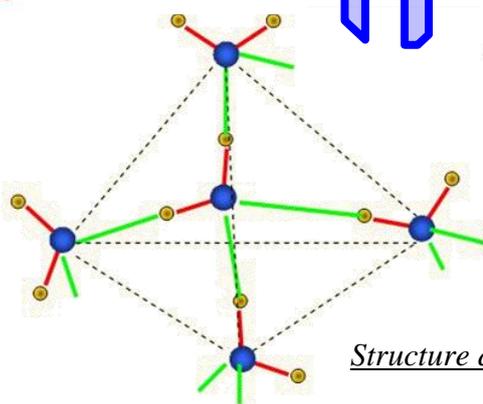
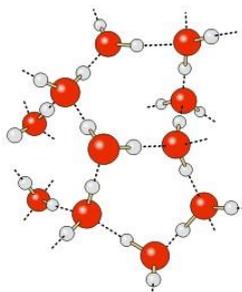


Toute molécule qui possède des groupes -O-H présente des liaisons hydrogène qui renforcent la cohésion du solide moléculaire.



L'eau H_2O : Les températures de changement d'état de l'eau sont élevées. À la pression atmosphérique : $T_{\text{fusion}} = 0^\circ\text{C}$ et $T_{\text{ébu}} = 100^\circ\text{C}$.

TP



Structure de la glace

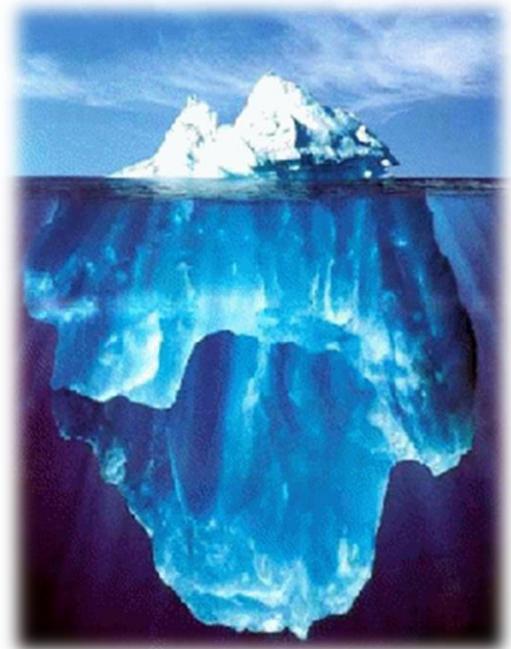
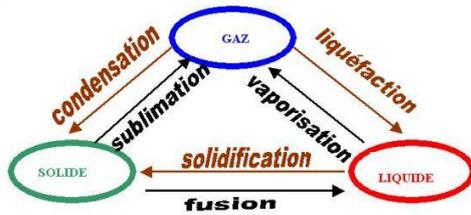
À quantités de matière égales, la glace occupe un plus grand volume que l'eau liquide. Cela est dû aux liaisons H. En établissant ses liaisons, les molécules d'eau adoptent une disposition spatiale qui conduit à une structure peu compacte pour la glace et à un comportement très particulier : la glace étant moins dense que l'eau liquide, **la glace flotte sur l'eau**. Peu de substances possèdent cette caractéristique. : L'eau, le bismuth et l'antimoine.

1.7.3. Changement d'état et interactions

On admet que **les températures de changement d'état sont une mesure indirecte des valeurs des forces d'interaction** entre les molécules ou les ions dans un solide. Plus elles sont élevées, plus les valeurs des forces sont grandes.



Les mesures **d'énergie thermique** s'effectuent dans un **calorimètre** thermiquement isolé, c'est-à-dire n'échangeant pas d'énergie avec le milieu extérieur.



Exemple de la fusion de la glace : La méthode des mélanges

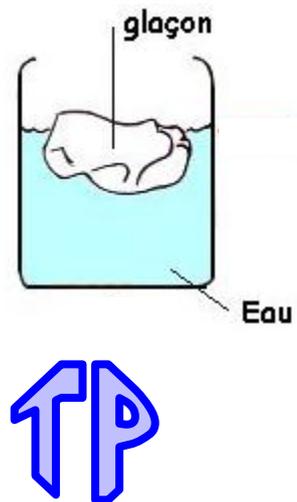
Soit une masse m_1 d'eau à la température Θ_i , dans laquelle on introduit une masse m_2 de glace à la température Θ_{fus} .

On laisse évoluer le mélange jusqu'à sa température finale d'équilibre Θ_f .

Une relation permet d'établir la variation de température $\Delta\Theta$ lors d'un transfert d'énergie thermique Q :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\Theta = m \cdot c \cdot (\Theta_f - \Theta_i)$$

- Avec Q : transfert thermique (énergie en J) ;
- m : masse du corps (en kg) ;
- Θ_f : température finale du corps (en °C) ;
- Θ_i : température initiale du corps (en °C) ;
- c : capacité thermique massique (en $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$, dépend du matériau constituant le corps).



Le transfert thermique peut faire changer d'état le corps : Dans les conditions de pression et température constantes, pour un corps pur, le transfert d'énergie thermique Q et la masse sont reliés par la relation :

$$Q = m \cdot L$$

- Avec Q : transfert thermique (énergie en J) ;
- m : masse du corps (en kg) ;
- L : chaleur latente (en $J \cdot kg^{-1}$, dépend du changement d'état).

Condensation	$L_C = -L_{sub}$	Sublimation
Liquéfaction	$L_L = -L_v$	Vaporisation
Solidification	$L_{sol} = -L_f$	Fusion

<p>Énergie thermique fournie par la masse m_1 d'eau</p> $Q_1 = m_1 \cdot c_{eau} \cdot \Theta_f - \Theta_i $	<p>Énergie thermique reçue par la masse m_2 de glace lors de sa fusion : $Q_f = m_2 \cdot L_f$</p> <p>Énergie thermique reçue par la masse m_2 d'eau formée</p> $Q_2 = m_2 \cdot c_{eau} \cdot \Theta_f - \Theta_{fus} $
<p>Énergie thermique fournie par l'eau tiède m_1 = Énergie thermique reçue par la glace</p>	
$Q_1 = m_1 \cdot c_{eau} \cdot \Theta_f - \Theta_i = Q_2 + Q_f = m_2 \cdot c_{eau} \cdot \Theta_f - \Theta_{fus} + m_2 \cdot L_f$	

Avec :

- la capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{\text{eau}} = 4,18 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$;
- sa température de fusion $\Theta_{\text{fus}} = 0 \text{ °C}$.

$$L_f = 1 / m_2 \cdot [m_1 \cdot c_{\text{eau}} \cdot | \Theta_f - \Theta_i | - m_2 \cdot c_{\text{eau}} \cdot | \Theta_f - \Theta_{\text{fus}} |]$$

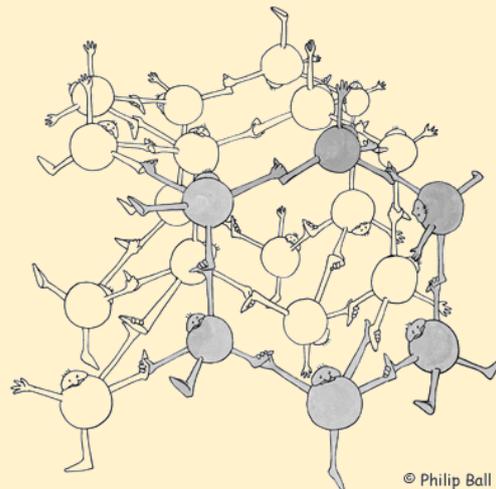
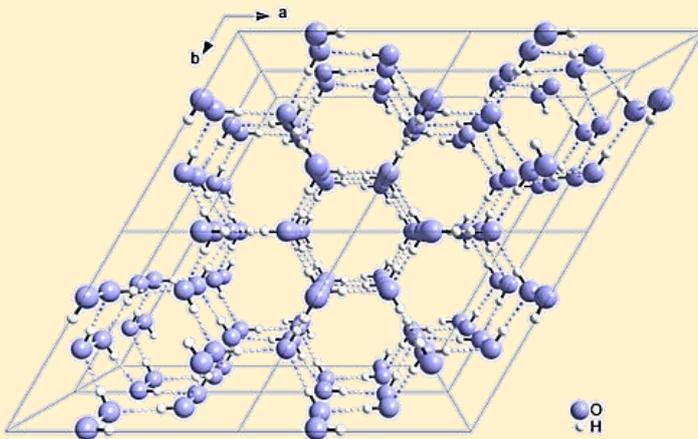
La valeur généralement donnée pour la chaleur latente de fusion de l'eau est $L_f = 330 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$.

L'eau possède plusieurs propriétés inhabituelles, parmi lesquelles son anomalie de densité, ses points de fusion et d'ébullition élevés et sa grande capacité thermique.

Le caractère dipolaire de la molécule d'eau permet de former de grandes associations de molécules.

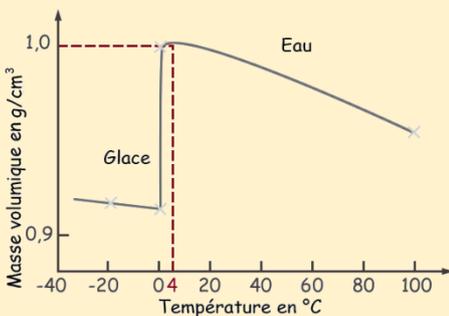
Les liaisons hydrogène contribuent à la création de ces formations plus importantes. Cette liaison est relativement faible par rapport aux liaisons covalentes. Alors qu'une liaison covalente OH possède une énergie de liaison d'environ 463 kJ/mol, l'énergie de liaison molaire d'une liaison non covalente entre hydrogène et oxygène ne représente qu'environ 4,3 % de l'énergie de la liaison covalente correspondante.

À l'état solide, chaque molécule d'eau est entourée de manière tétraédrique par quatre autres molécules d'eau. Chaque atome d'oxygène est lié à deux atomes d'hydrogène par des liaisons covalentes, et à deux autres atomes d'hydrogène par des liaisons hydrogène. Du fait du réseau des liaisons hydrogène, il s'agit d'une structure ouverte. Dans la glace, chaque molécule d'eau est liée à quatre autres molécules d'eau par des liaisons hydrogène. Il se forme un anneau hexagonal.



Structure de la glace

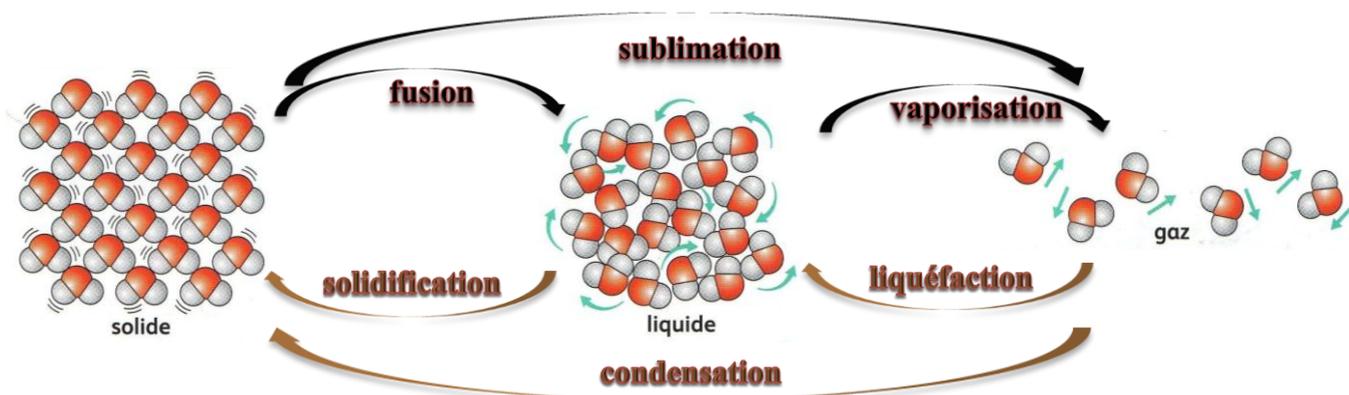
Lors d'une augmentation de la température, l'agitation moléculaire augmente, avec pour effet la rupture de certaines liaisons hydrogène ; cette structure s'effondre alors partiellement. L'anomalie de densité de l'eau peut donc s'expliquer ainsi :



Lorsque la glace fond, sa structure très ordonnée disparaît ; les molécules d'eau peuvent alors être plus proches les unes des autres, ce qui conduit à une augmentation de la masse volumique, avec un maximum à 4°C. Mais au-delà, l'agitation thermique croissante conduit à occuper un volume plus grand, et la masse volumique diminue.

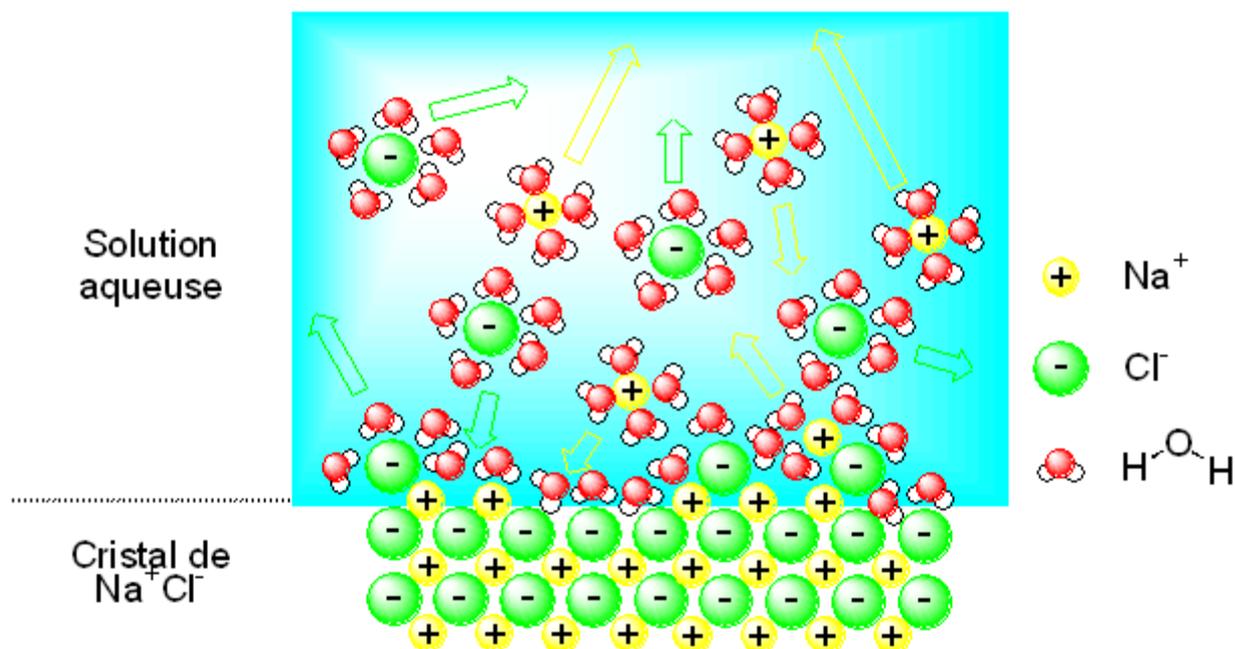
La masse volumique d'un corps correspond au quotient de sa masse m par son volume V . Pour l'eau, la masse volumique est la plus élevée à 4°C, où elle vaut 1,000 g/cm³. Elle diminue jusqu'à 0,998 g/cm³ lors d'un refroidissement jusqu'à 0°C, et jusqu'à moins de 0,92 g/cm³, par à-coups, lorsqu'elle gèle.

© La Main à la pâte 2012 : <http://www.lamap.fr>



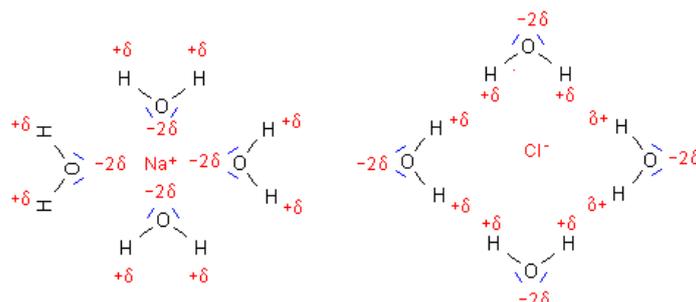
1.7.4. Dissolution de composés solides ou moléculaires

⇒ Dissolution d'un solide ionique



Les molécules d'eau, polaires, exercent sur le cristal des forces électriques qui dissocient le cristal ionique. Les deux étapes, **dissociation du cristal en ions séparés et solvation des ions**, sont suivies de la dispersion des ions solvatés dans tout le volume du solvant.

Le phénomène de solvation des ions, dû à l'interaction ion-dipôle, est d'autant plus accentué que l'ion est petit et que sa charge est élevée.



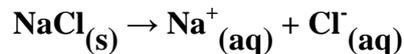
- Une solution aqueuse de chlorure de sodium est notée $\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$.

On tolère l'écriture $(\text{Na}^+ + \text{Cl}^-)$ mais pas NaCl qui désigne le solide ionique et non la solution aqueuse.

- La notation (s) désigne un solide, (l) désigne un liquide et (g) un gaz.

⇒ Bilan de la Dissolution

L'équation de dissolution (ou dissolution) s'écrit :



Pour rappeler que les ions Na^+ et Cl^- sont solvatés (liés à des molécules d'eau) on les écrira souvent $\text{Na}^+(\text{aq})$ et $\text{Cl}^-(\text{aq})$.

Il faut atteindre une température élevée (température de fusion $t_F = 801^\circ\text{C}$ pour le NaCl) pour que le solide cristallin fonde en donnant un liquide dans lequel les ions sont devenus mobiles. Par contre, c'est à la température ordinaire (dans les CNTP ou Conditions Normales de Température et de Pression, soit à 25°C et à la pression atmosphérique de 1013 hPa), que la dissolution du chlorure de sodium dans l'eau se produit.

⇒ Variations d'énergie lors de la dissolution

Les énergies mises en jeu dans la dissolution d'un solide sont :

– **L'énergie de cohésion du solide** : On doit fournir de l'énergie pour vaincre cette cohésion. Dans le cas d'un solide moléculaire qui, en se dissolvant donne des molécules avec liaisons covalentes, l'interaction entre ces unités covalentes du solide étant du type Van der Waals, l'énergie requise pour vaincre la cohésion du solide est faible.

– **L'énergie de solvation** : Elle est présente lors de l'attraction entre le **soluté**, porteur soit de charges ioniques ou de dipôles induits, et les molécules plus ou moins polaires du **solvant**. La solvation est toujours **exothermique**. Elle est de grandeur comparable à l'énergie de cohésion de cristaux ioniques et peut ainsi permettre leur dissolution. Elle est faible dans le cas de la solvation de molécules covalentes issues d'un solide moléculaire, mais là aussi elle est généralement plus importante que l'énergie de cohésion associée aux forces de Van der Waals.

– **L'énergie de changement de structure du solvant** : Pour que les molécules de solvant puissent s'attacher aux entités dissoutes lors de la solvation, pour que le soluté puissent même s'insérer dans la structure « molle » du solvant, il faut dissocier cette structure aussi « souple » soit-elle, ce qui exige une certaine énergie. C'est la valeur de cette énergie qui régit la **solubilité** des solides moléculaires.

Elle limite la solubilité de composés covalents non-polaires.

Dans le cas de composés polaires, les forces de cohésion dans le solide et les interactions soluté/solvant (énergie de solvation) sont plus grandes. Cette énergie liée au changement de structure du solvant devient moins importante, et la solubilité augmente.

L'énergie de changement de structure du solvant est négligeable dans le cas des solides ioniques, étant complètement dominée par les deux premiers types d'énergie.

Exemples de quelques solubilités de composés chimiques dans l'eau à 20°C : La solubilité dans l'eau est la quantité maximale d'une substance (exprimée en grammes ou en moles) pouvant se dissoudre entièrement dans un volume donné d'eau pure.

- Carbonate de calcium : moins 0,0153 g/L
- Hydroxyde de calcium (chaux éteinte) : 1,59 g/L
- Sulfate de cuivre : 220 g/L
- Chlorure de sodium : 357 g/L
- Nitrate de potassium : 357 g/L
- Chlorure de calcium : 425 g/L

⇒ Concentration molaire en soluté apporté

La concentration molaire C d'une solution est la concentration molaire de soluté apporté, c'est **le rapport de la quantité de matière de soluté par le volume V de la solution**:

$$C = \frac{n}{V}$$

n : Quantité de matière en soluté apporté (en mol).

V : Volume de solution (en L).

c : Concentration molaire en (mol.L⁻¹).

⇒ Concentration molaire effective

Soit X une espèce chimique dissoute (ion ou molécule). La **concentration molaire effective** de cette espèce dissoute dans la solution est notée $[X]$:

Ainsi, puisqu'il y a **conservation de la matière lors de la dissolution** $\text{NaCl}_{(s)} \rightarrow \text{Na}^+_{(aq)} + \text{Cl}^-_{(aq)}$,

$$C_{\text{NaCl}} = [\text{Na}^+] = [\text{Cl}^-]$$

Ou encore pour la dissolution du fluorure de calcium $\text{CaF}_{2(s)} \rightarrow \text{Ca}^{2+}_{(aq)} + 2 \text{F}^-_{(aq)}$

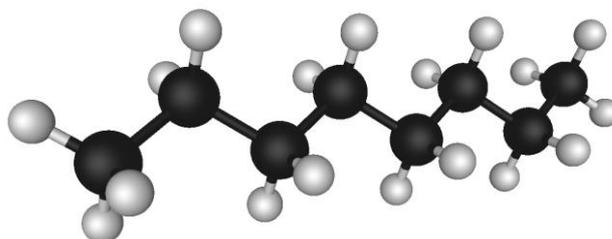
$$C_{\text{CaF}_2} = [\text{Ca}^{2+}] = \frac{[\text{F}^-]}{2}$$

Les solutions demeurent ainsi électriquement neutres

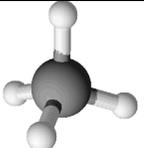
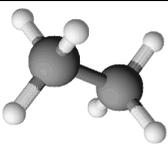
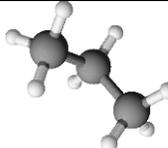
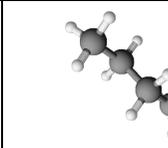
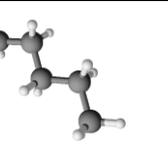
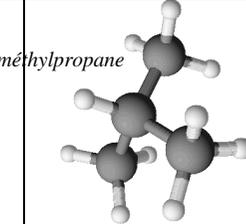
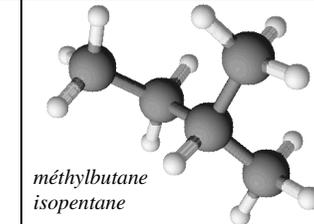
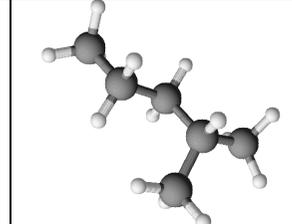
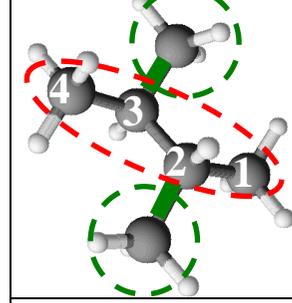
1.8. Nomenclature des alcanes et des alcools ; formule semi-développée

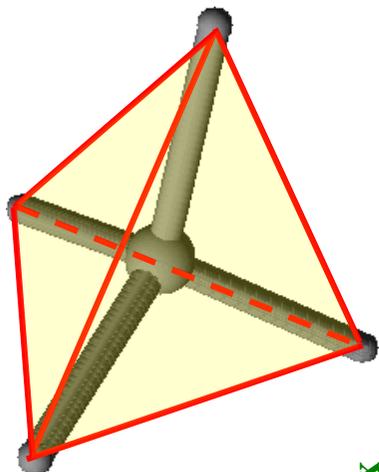
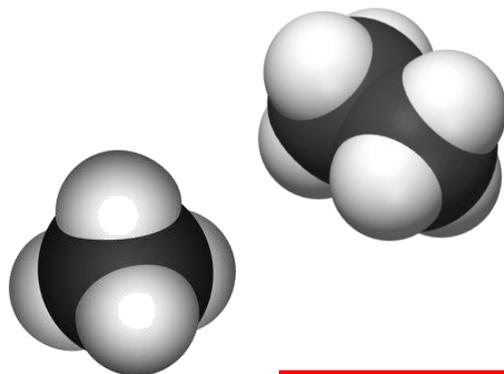
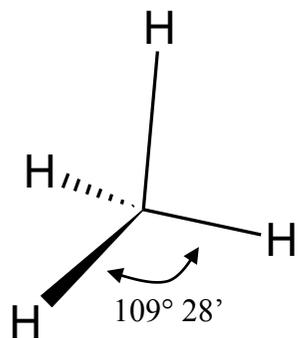
1.8.1. Trois familles d'hydrocarbures

Un hydrocarbure est un composé organique contenant exclusivement des atomes de carbone C et d'hydrogène H. Ils possèdent en conséquence une formule brute de type : C_xH_y, où x et y sont deux entiers naturels.



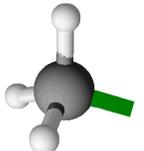
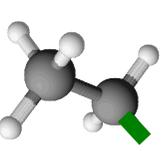
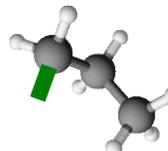
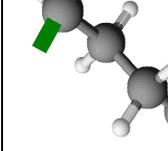
⇒ Hydrocarbures saturés

Méthane	Éthane	Propane	Butane	Pentane	Hexane
CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄
					
Méthane	Éthane	Propane	n-butane	n-pentane	n-hexane
			<i>méthylpropane</i> 		
			2-méthylpropane	2-méthylbutane 2,2-diméthylpropane	2-méthylpentane 3-méthylpentane 2,2-diméthylbutane
					
					2,3-diméthylbutane



n°1, n°2-substituants | nom | saturation

Radicaux Alkyles

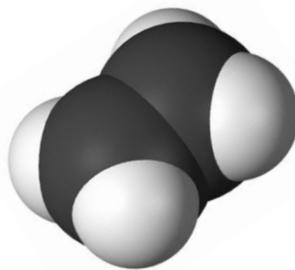
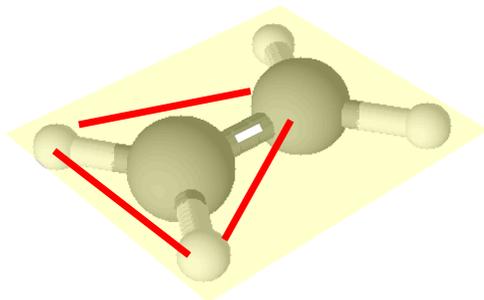
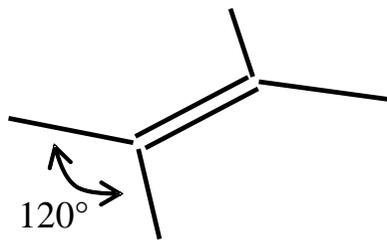
			
méthyl	éthyl	propyl	butyl

Alcanes
C_nH_{2n+2}

⇒ Hydrocarbures insaturés

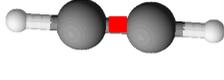
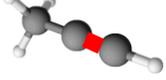
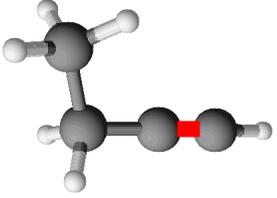
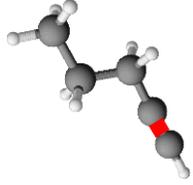
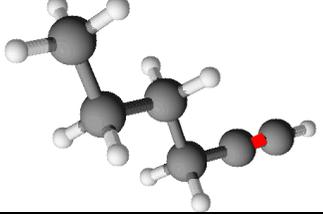
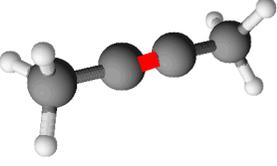
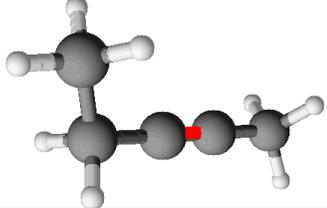
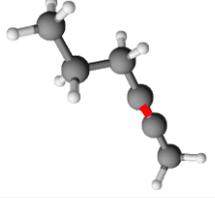
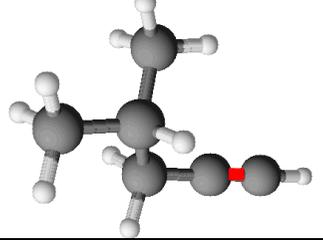
Alcènes
 C_nH_{2n}

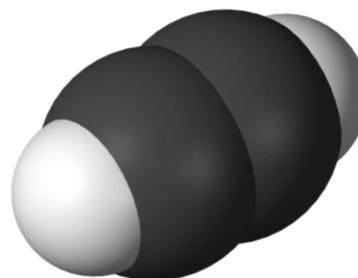
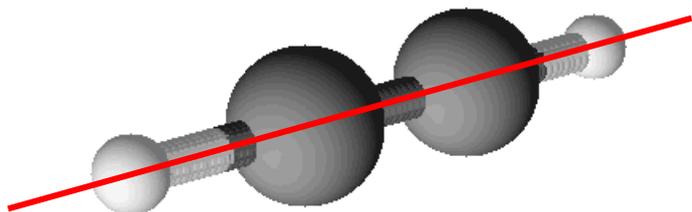
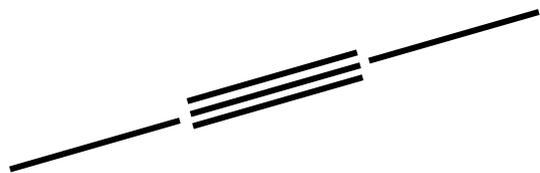
Éthène	Propène	Butène	Pentène	Hexène
C_2H_4	C_3H_6	C_4H_8	C_5H_{10}	C_6H_{12}
 <i>Éthylène</i>				
Éthène	Propène	But-1-ène	Pent-1-ène	Hex-1-ène
		But-2-ène	Pent-2-ène	Hex-2-ène
		2-méthylprop-1-ène	2-méthylbut-1-ène	Hex-3-ène
			3-méthylbut-1-ène	2-méthylpent-1-ène
			2-méthylbut-2-ène	3-méthylpent-1-ène



Alcynes

C_nH_{2n-2}

Éthyne	Propyne	Butyne	Pentyne	Hexyne
C_2H_2	C_3H_4	C_4H_6	C_5H_8	C_6H_{10}
 <i>Acétylène</i>				
Éthyne	Propyne	But-1-yne	Pent-1-yne	Hex-1-yne
				
		But-2-yne	Pent-2-yne	Hex-2-yne
			3-méthylbut-1-yne	Hex-3-yne
				3-méthylpent-1-yne
				
				4-méthylpent-1-yne
				4-méthylpent-2-yne



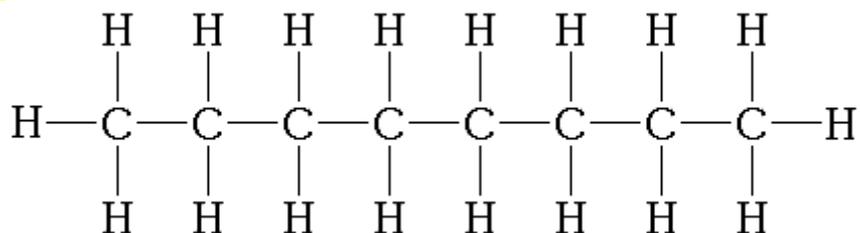
1.8.2. La formule semi développée

En chimie organique, une formule semi-développée est une simplification d'une formule développée plane, dans laquelle **on ne représente pas les liaisons carbone-hydrogène**.

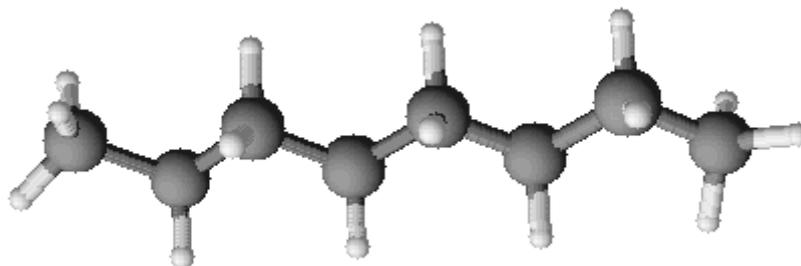
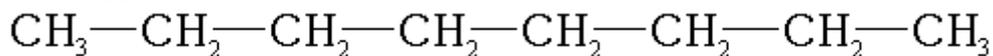
Le principe de représentation des atomes est le même : une lettre, issue du tableau périodique des éléments, et un trait par liaison (ou plusieurs si la liaison est double ou triple).

L'octane C_8H_{18} :

Formule développée :

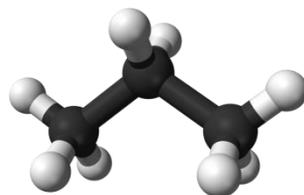


Formule semi-développée :



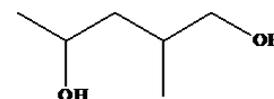
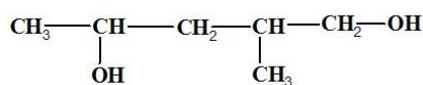
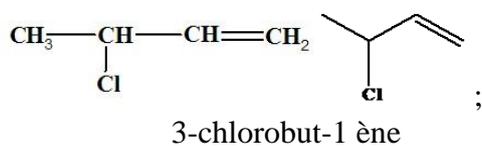
On peut aussi inverser les C et les H pour insister sur les liaisons carbone-carbone.

Le propane, C_3H_8 :

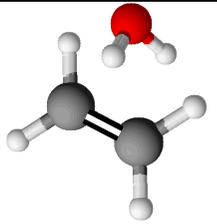
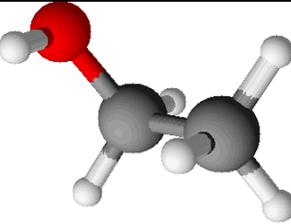
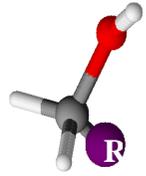
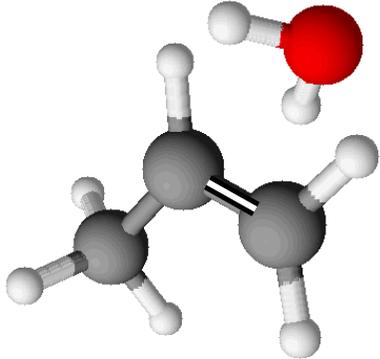
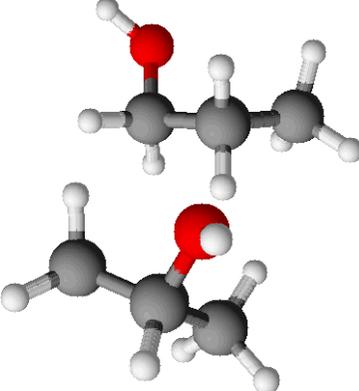
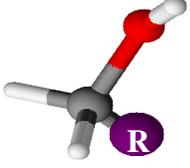
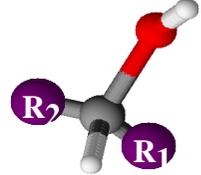
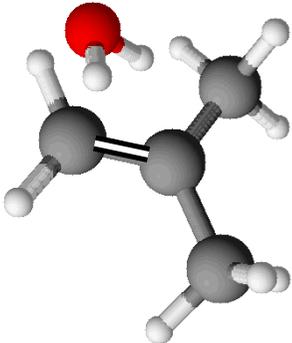
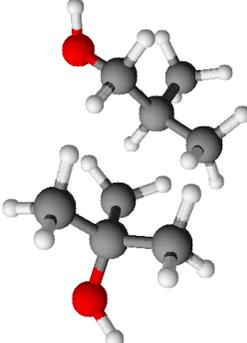
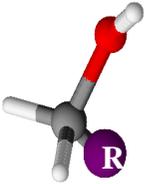
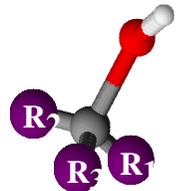


⇒ **Formule topologique**

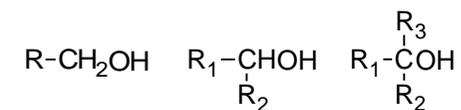
Carbones et hydrogènes y sont implicites dans le respect de la valence quatre du carbone.



2-méthylpentane-1,4-diol

C_2H_4	 $H_2C=CH_2 + H_2O$	=	 C_2H_5OH	 alcool <i>classe</i> I
C_3H_6	 $H_3C-CH=CH_2 + H_2O$	=	 C_3H_7OH	 alcool <i>classe</i> I
				 alcool <i>classe</i> II
C_4H_8	 $H_2C=CCH_3-CH_3 + H_2O$	=	 C_4H_9OH	 alcool <i>classe</i> I
				 alcool <i>classe</i> III

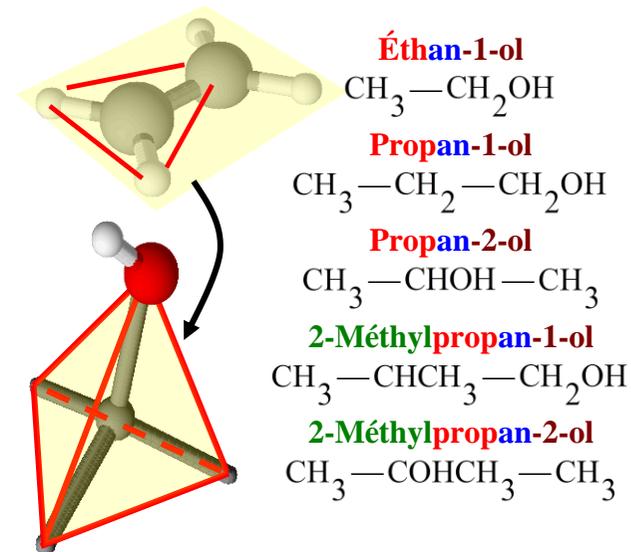
1.8.3. Alcools R-OH



Un **alcool** (de l'arabe al-khwil لوكحل, ou al-ghawl لوعلا, « l'esprit » (lit.), « toute substance pulvérisée », « liquide distillé ») est un composé organique dont l'un des carbones est lié à un **groupement hydroxyle** « **-OH** ».

substituant | nom | saturation | fonction

- **Fonction** : *suffixe* « **ol** »
- **Substituant** : *préfixe* « **hydroxy** »



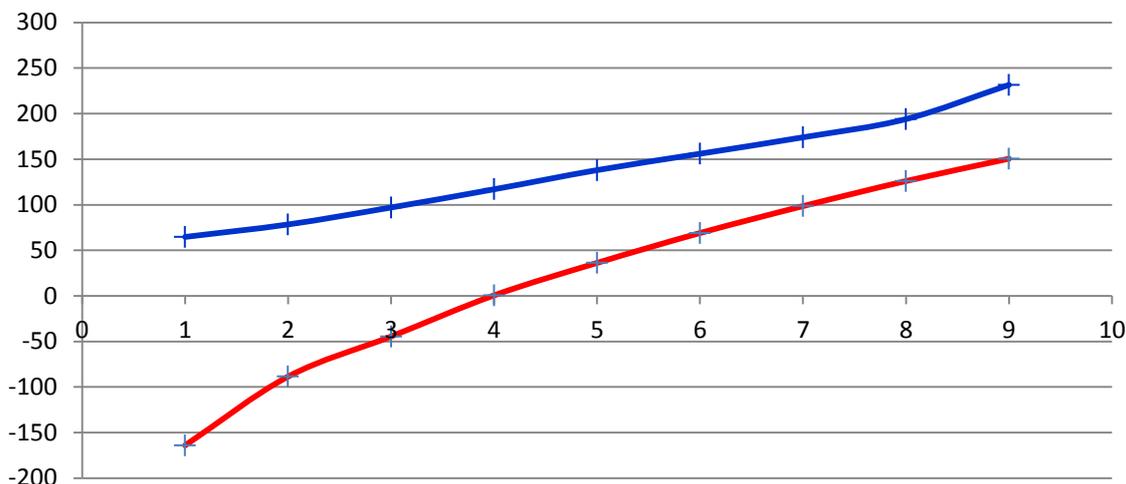
1.8.4. Température de changement d'état

⇒ Températures d'ébullition pour différents alcanes linéaires et alcools primaires

Nombre de carbones	1	2	3	4	5	6	7	8	9
alcanes	-161,4	-88,6	-42,2	-0,6	36,3	69	98,5	126	150,5
alcools	64,7	78,4	97	117	138	156	174	194	231,5

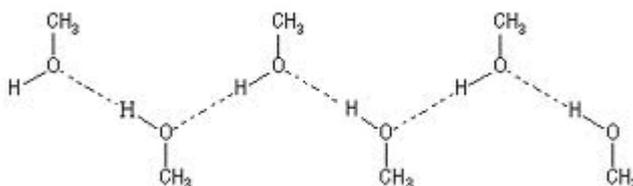
Les températures sont affichées en °C (degré Celsius).

Températures d'ébullition en °C pour différents alcanes linéaires et alcools primaires



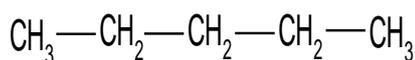
- L'intensité des interactions de Van der Waals et donc les températures d'ébullition et de fusion augmentent avec la longueur de la chaîne carbonée.
- Les alcools ont des températures de changement d'état supérieures grâce à l'existence de liaisons hydrogène dues aux groupes hydroxyles.

Ex :

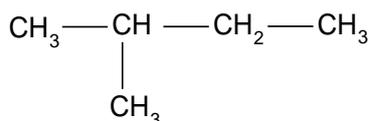


- Dans l'eau les liaisons hydrogène augmentent la cohésion ce qui explique l'élévation de ces températures.

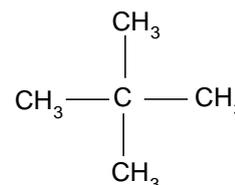
⇒ Températures d'ébullition d'isomères de formule C₅H₁₂



Pentane : 36°C



2-méthylbutane : 28°C



2,2-diméthylpropane : 9,5°C

- Les températures de changement d'état des alcanes sont d'autant plus basses que ceux-ci sont ramifiés.

1.8.5. Miscibilité des alcools avec l'eau

Des alcools avec des chaînes carbonées de plus en plus longues sont mélangés avec de l'eau. Les mélanges obtenus sont homogènes mais avec une solubilité qui diminue.

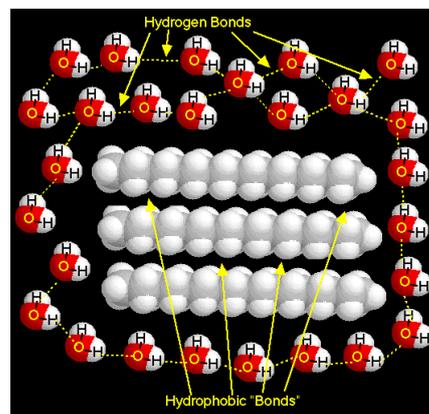
Pour l'hexan-1-ol, $s = 6 \text{ g.L}^{-1}$

- La miscibilité des alcools avec l'eau diminue lorsque la longueur de la chaîne carbonée augmente.

Les molécules organiques contenant des atomes d'hydrogène portés par des atomes d'oxygène, d'azote ou de fluor vont avoir tendance à se lier entre elles et aux molécules d'eau grâce aux liaisons hydrogènes : elles sont **hydrophiles**.

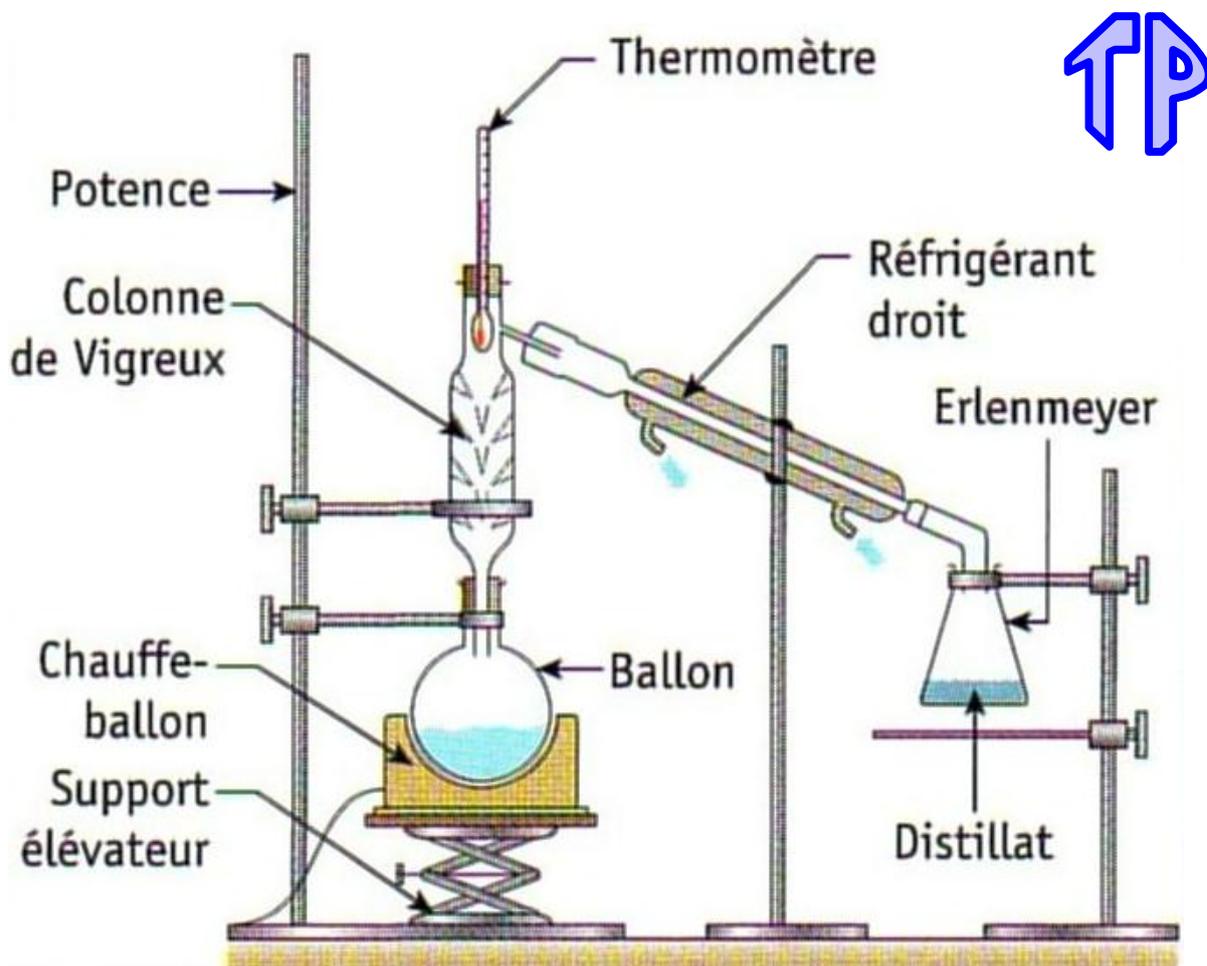
Les molécules organiques contenant de longues chaînes carbonées ne peuvent pas créer de liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau et les molécules hydrophiles. Elles ne se mélangent donc pas et sont dites **hydrophobes**.

Les molécules hydrophiles et les molécules hydrophobes ne sont pas miscibles.



⇒ Application : Distillation fractionnée

Elle permet de séparer les constituants d'un mélange de liquides miscibles possédant des températures d'ébullition différentes comme alcool (éthanol $\Theta_{eb} = 78^\circ\text{C}$) et eau ($\Theta_{eb} = 100^\circ\text{C}$).



Le pétrole, qui est un mélange de différents produits hydrocarbonés, pour être utilisable dans les différentes branches de l'industrie et des moteurs à combustion, doit subir une série de traitements divers. [...]

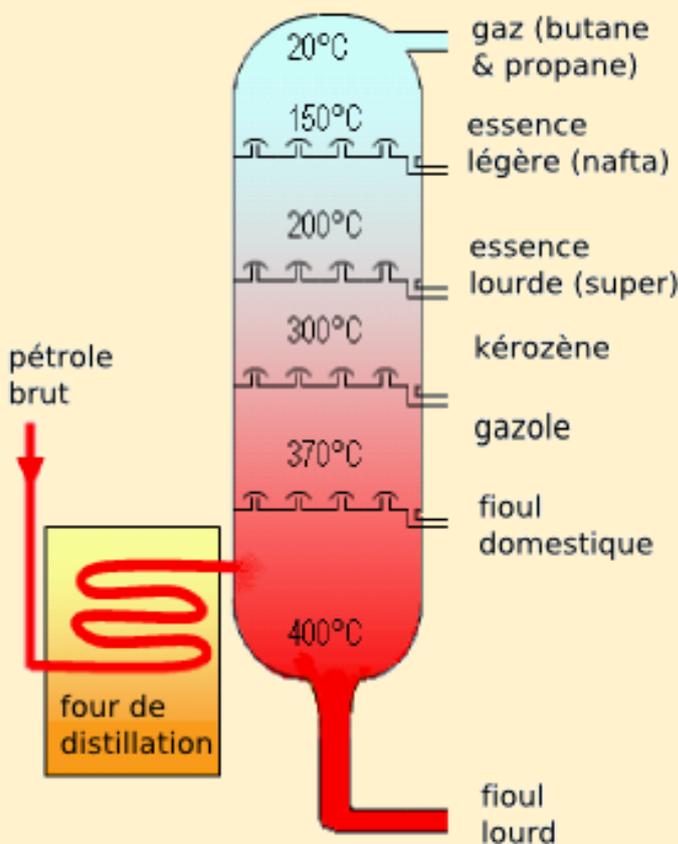
Chaque hydrocarbure pur possède des caractéristiques chimiques et physiques spécifiques. Le tableau ci-contre montre les températures d'ébullition des alcanes linéaires légers, très courants dans le pétrole quelle que soit sa provenance.

Nom	Température d'ébullition (°C)	Formule
méthane	-161,4	CH ₄
éthane	-88,6	C ₂ H ₆
propane	-42,2	C ₃ H ₈
butane	-0,6	C ₄ H ₁₀
pentane	36,3	C ₅ H ₁₂
hexane	69	C ₆ H ₁₄

Le raffinage consiste à utiliser d'abord les caractéristiques physiques de chacun des composants contenus dans le mélange telles que la **température d'ébullition** pour les séparer et extraire des fractions primaires.

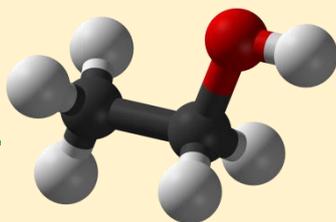
Cette opération est appelée la distillation. Tout comme chez le bouilleur de cru, on chauffe le pétrole dans une colonne fermée qu'on appelle la colonne de distillation atmosphérique et grâce à la différence de température d'ébullition des composants en présence et avec la vaporisation des fractions plus ou moins légères, on recueille à différents niveaux de la colonne des fractions de produits légers, intermédiaires, moyens et lourds.

La distillation atmosphérique se fait dans une colonne munie d'un certain nombre de plateaux perforés et munis de clapets, en général de 30 à 50 plateaux, conduisant à une distillation fractionnée.

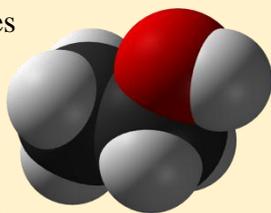


Wikipedia – article « Raffinage du pétrole »

1.8.6. Le bioéthanol



Dans les biocarburants de première génération seules les tubercules et les racines, les végétaux stockent leurs sucres et leurs huiles de réserve. Ainsi les betteraves concentrent du sucre



première les racines, les grains que les sucres et Ainsi les sucre



(saccharose $C_{12}H_{22}O_{11}$) dans leurs racines et les cannes à sucre dans la tige. Or, le sucre de ces organes de réserve est facilement transformable en éthanol par fermentation anaérobie utilisée depuis l'Antiquité pour produire des boissons alcoolisées.

Vers 1810, Gay-Lussac en définit l'équation de la réaction globale, puis en 1858 Louis Pasteur montre l'importance des micro-organismes contenus dans les levures.



Pour produire du bioéthanol de première génération certaines cultures sont mieux appropriées que d'autres, ainsi un hectare de betteraves (soit 90.000 kg de betteraves) permet l'obtention de 9200 L de bioéthanol alors qu'un hectare de maïs et de blé en produisent respectivement 3600 L et 2400 L.

- **Les biocarburants (ou agroc carburants) de deuxième génération** n'utiliseront pas de denrées alimentaires comme les céréales ou les betteraves pour leur fabrication. En utilisant la plante entière et en valorisant les différents constituants du végétal qui ne sont pas utilisés par ailleurs (biomasse lignocellulosique constituée de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine) ils fournissent une solution plus écologique, plus équitable et plus durable. Pour aller chercher les sucres dans cette biomasse lignocellulosique, emprisonnée dans une matrice de lignine, il faut utiliser des enzymes qui « grignotent » l'écorce pour lui permettre d'utiliser les sucres des parois. Au final, on obtient des sucres simples, similaires à ceux des betteraves, qui peuvent être directement transformés en alcool (bioéthanol).

L'Union européenne a fixé un objectif d'incorporation de 10 % de biocarburants dans le pool essence-gazole à l'horizon 2020.

- **La fermentation alcoolique, une transformation non totale**

Cette réaction biochimique anaérobie, est catalysée par des enzymes du genre Saccharomyces qui peuvent provenir du fruit dans le cas du raisin ou qui sont ajoutées sous forme de levures. Ces enzymes sensibles à la température « meurent » lorsque le titre de la solution en alcool atteint 16 à 18 degrés. La fermentation d'un jus de raisin, d'un jus de betterave ou d'un jus de canne conduit donc à une solution alcoolique titrant au maximum 16 à 18 degré Gay-Lussac*.

Lors de la fermentation de ces produits, il se forme aussi, en quantités relativement faibles, une série de sous-produits caractéristiques, dont, entre autres, des acides, des aldéhydes, de la glycérine et les huiles de fusel.

***Titre Gay-Lussac** : Une solution alcoolique qui titre x° Gay-Lussac contient x millilitres d'éthanol pur dans 100 mL de solution.

- **Obtenir une solution alcoolique plus concentrée, puis du bioéthanol**

La solution alcoolique obtenue par fermentation doit être enrichie en éthanol. La température d'ébullition normale de l'éthanol est de 78 degrés Celsius, une température très inférieure à celle de l'eau qui ouvre la

possibilité de séparer ces deux liquides miscibles au moyen de la distillation.

Cette opération de séparation de l'alcool, de l'eau et des impuretés, a lieu dans des colonnes de distillation équipées de plateaux renforceurs, agissant chacun comme un **alambic**. Elle conduit à un alcool brut ou flegme.

Ce dernier subit alors des opérations complémentaires selon les marchés visés.

- Rectification (+ déshydratation éventuelle) pour l'industrie
- Rectification et surfinage (les distillations sont répétées jusqu'à ce que le distillat réponde aux exigences de pureté) pour l'industrie et l'alimentaire
- Déshydratation pour l'usage carburant

Déarrassé des dernières molécules d'eau, on obtient un bioéthanol encore plus concentré en alcool (de 96 à 99 °) utilisable par nos voitures.



⇒ Énergie libérée lors de la combustion de l'éthanol

On produit de la chaleur par combustion de l'éthanol :



Poêle domestique au bioéthanol

On imbibe légèrement d'éthanol, un peu de laine de verre fixée à l'extrémité d'une tige de verre. Puis on enflamme et plonge dans un tube à essai froid tenu par une pince en bois.

En fin de combustion, on observe des « buées » sur les parois du tube.

On met un peu d'eau de chaux dans le tube, elle se trouble après agitation.

En conclusion :



Toute combustion a besoin d'**énergie** pour être activée. De la chaleur, une étincelle, un frottement...

• Aspect énergétique

Une masse $m_1 = 100$ g d'eau est pesée dans la boîte.

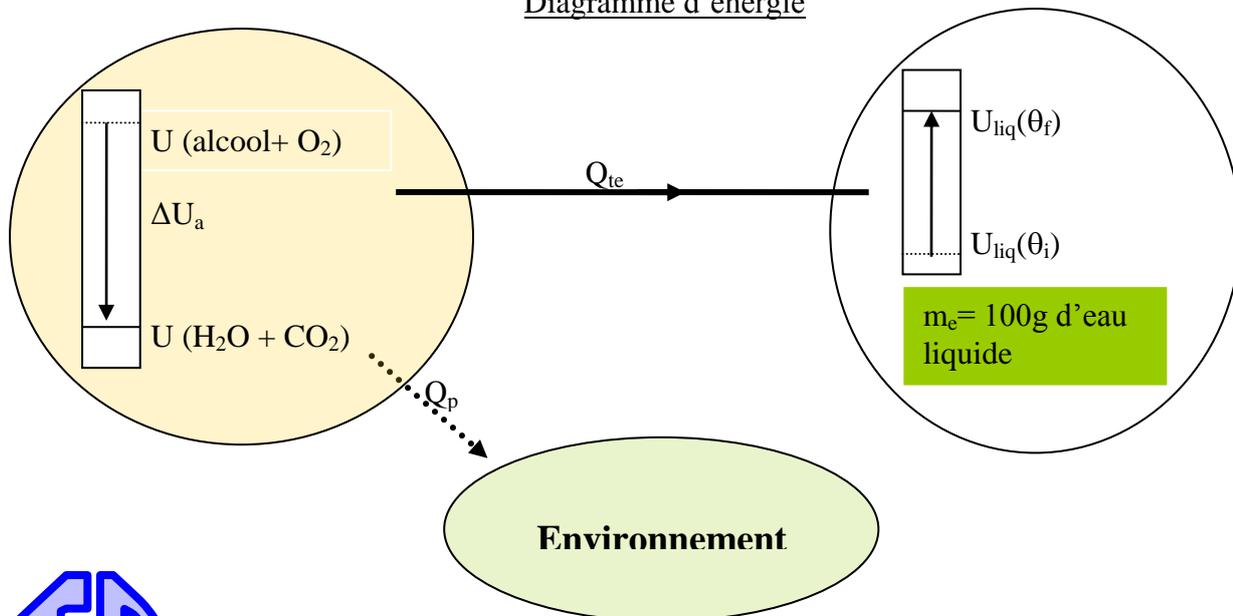
Une masse de 2,0 g d'alcool à brûler est pesée au dernier moment, pour éviter son évaporation, dans la coupelle.

La combustion de l'alcool sert en partie à élever la température des 100 g d'eau de la température θ_i à θ_f .

La capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{eau} = 4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.



Diagramme d'énergie



ΔU_a l'énergie libérée par la combustion de 2,0 g d'alcool.

Q_{te} l'énergie thermique effectivement transférée à l'eau.

Q_p l'ensemble des pertes énergétiques vers le milieu extérieur.

$$\Delta U_a = Q_p + Q_{te}$$

Et,

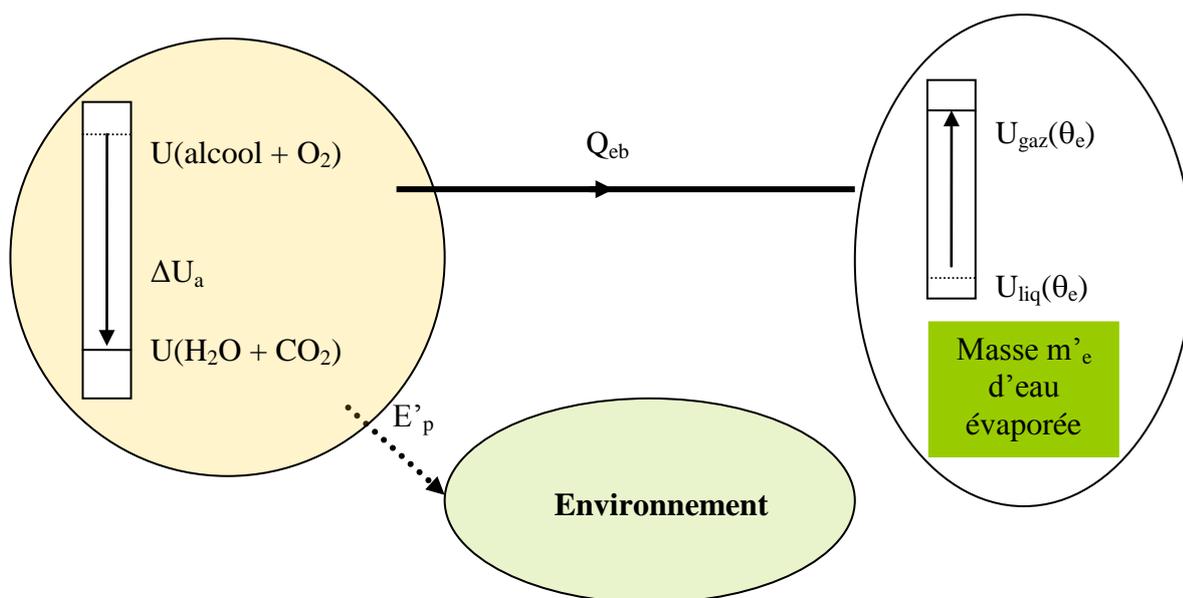
$$Q_{te} = U_{liq}(\theta_f) - U_{liq}(\theta_i) = m_e \times c_{eau} \times (\theta_f - \theta_i)$$

Une masse de 2,0 g d'alcool à brûler est pesée au dernier moment, pour éviter son évaporation, dans la coupelle.

Une masse $m_2 = 30$ g d'eau, placée dans la boîte, est portée à ébullition commençante avec un bec puis rapidement pesée et placée au-dessus de la coupelle dont on enflamme l'alcool.

La combustion de l'alcool dans les mêmes conditions que précédemment sert en partie à évaporer une partie de cette eau.

m_3 étant la masse d'eau restant



ΔU_a l'énergie libérée par la combustion de 2,0 g d'alcool.

Q_{eb} l'énergie thermique nécessaire à la vaporisation de l'eau.

Q'_p l'ensemble des pertes vers l'extérieur.

$$\Delta U_a = Q'_p + Q_{eb} \quad \text{et} \quad \Delta U_a = Q_p + Q_{te}$$

2. Champs et forces

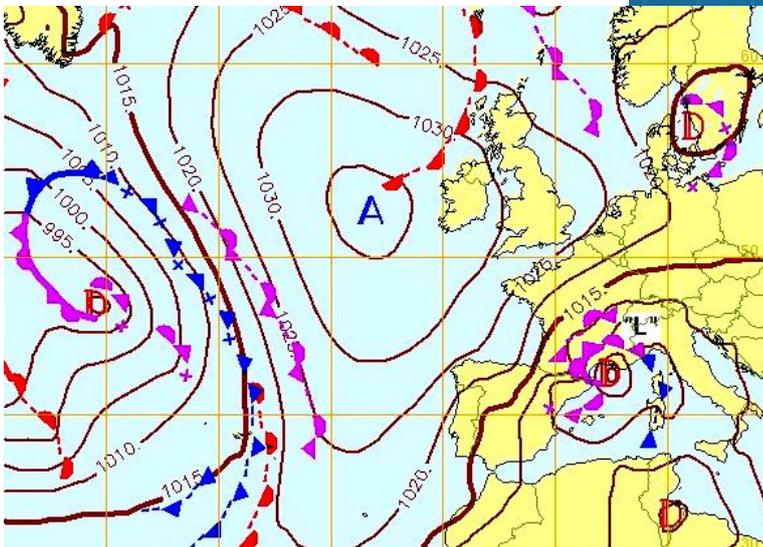
2.1. Exemples de champs scalaires et vectoriels : pression, température, vitesse dans un fluide

⇒ Définition

Un champ est une grandeur physique associée à chaque point de l'espace considéré.

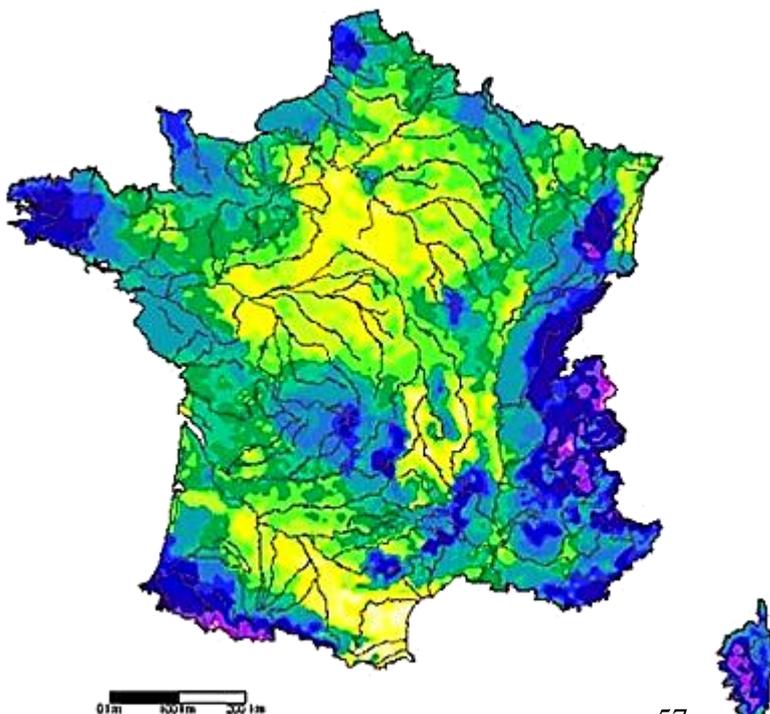
- Si, comme la température, la grandeur physique est complètement décrite par sa valeur scalaire, alors **le champ est scalaire**.

Isocontours et isosurfaces de champs scalaires, avec leurs propriétés :

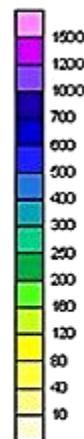


Isocontours du champ scalaire
« pression »

TP



en mm

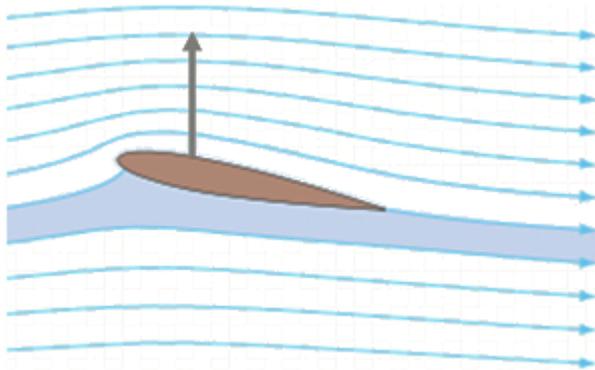


Isosurfaces du champ scalaire
« précipitations »

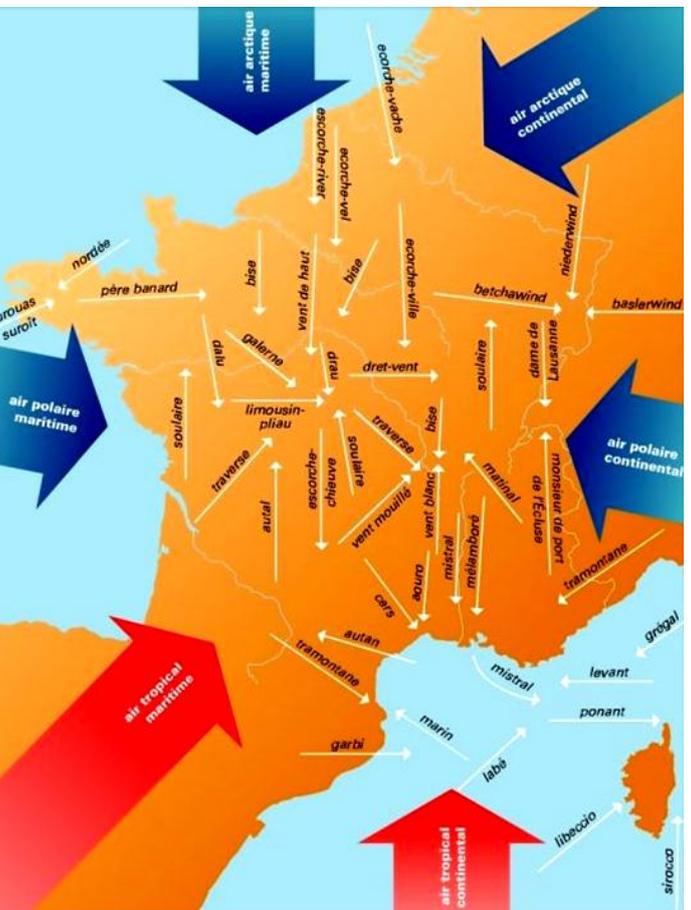
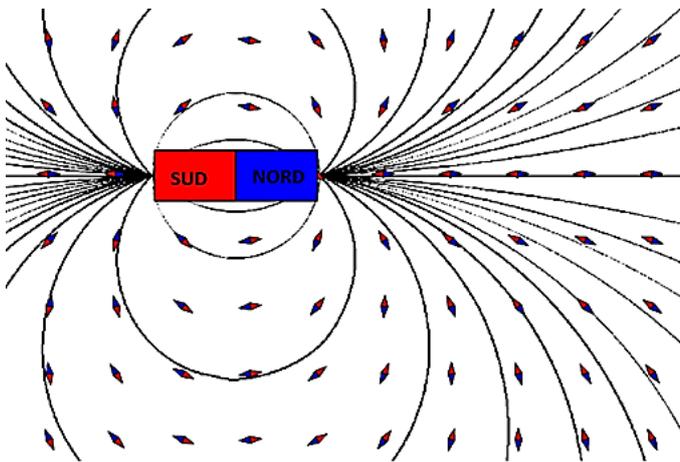
PRECIPITATIONS EFFICACES AU 01/09/2010
Cumul depuis le 01/09 précédent

- Si, comme la vitesse du vent, la grandeur physique doit être précisée en direction et en sens, alors **le champ est vectoriel**.

Lignes de champ - avec leurs propriétés- pour le champ vectoriel :

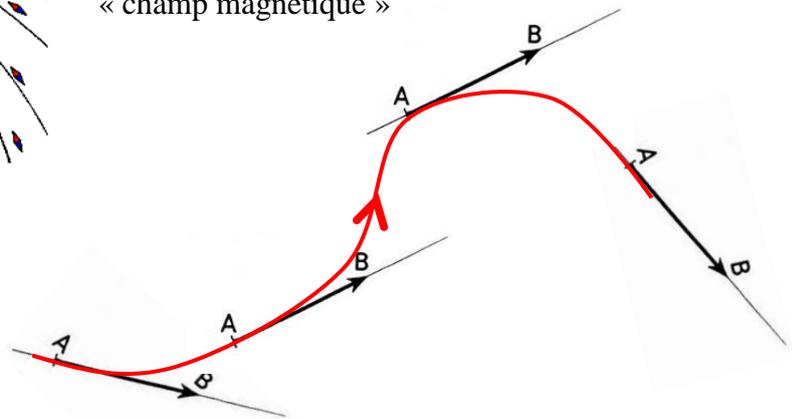


Lignes du champ vectoriel
« vitesse instantanée »

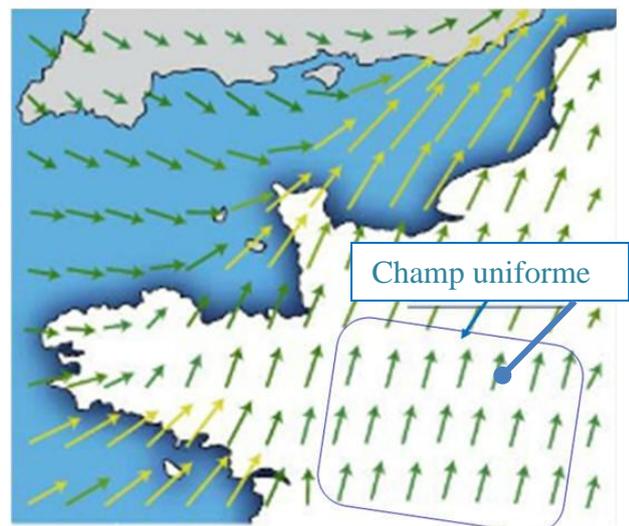


Lignes du champ vectoriel
« champ magnétique »

Une **ligne de champ** est une ligne tangente au vecteur champ, en chacun de ses points. Elle est orientée par une flèche dans le même sens que celui du champ.



Lorsque la grandeur physique scalaire ou vectorielle associée est constante en tout point de l'espace, **le champ est uniforme**.



2.2. Champ magnétique : sources de champ magnétique (Terre, aimant, courant)

Un champ magnétique est issu de courants électriques (comme un électron en orbite autour du noyau). Il est noté \vec{B} et s'exprime en Tesla T.

Ce champ **vectoriel** est décrit à l'aide du vecteur \vec{B} qui en donne sa direction et son sens.



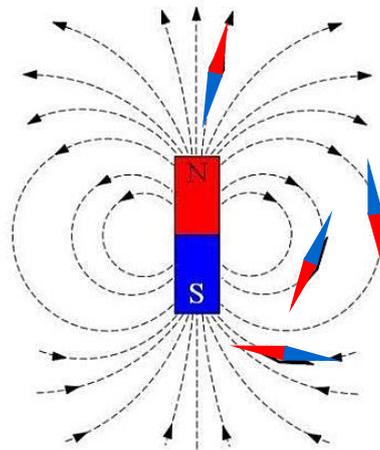
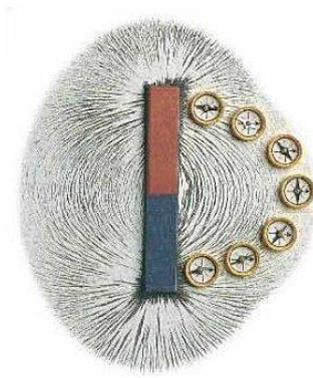
Son intensité est donnée à l'aide d'un teslamètre.

$$\begin{aligned} \vec{B}_{\text{terrestre}} &= 5 \cdot 10^{-5} \text{ T} \\ \vec{B}_{\text{aimant droit}} &= 10^{-2} \text{ T} \\ \vec{B}_{\text{électro aimant}} &= 10 \text{ T} \end{aligned}$$

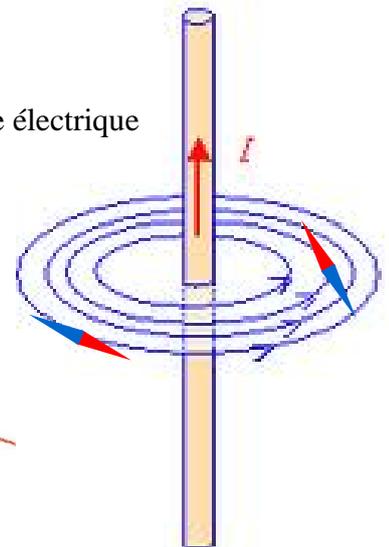


⇒ Spectres de champs magnétiques

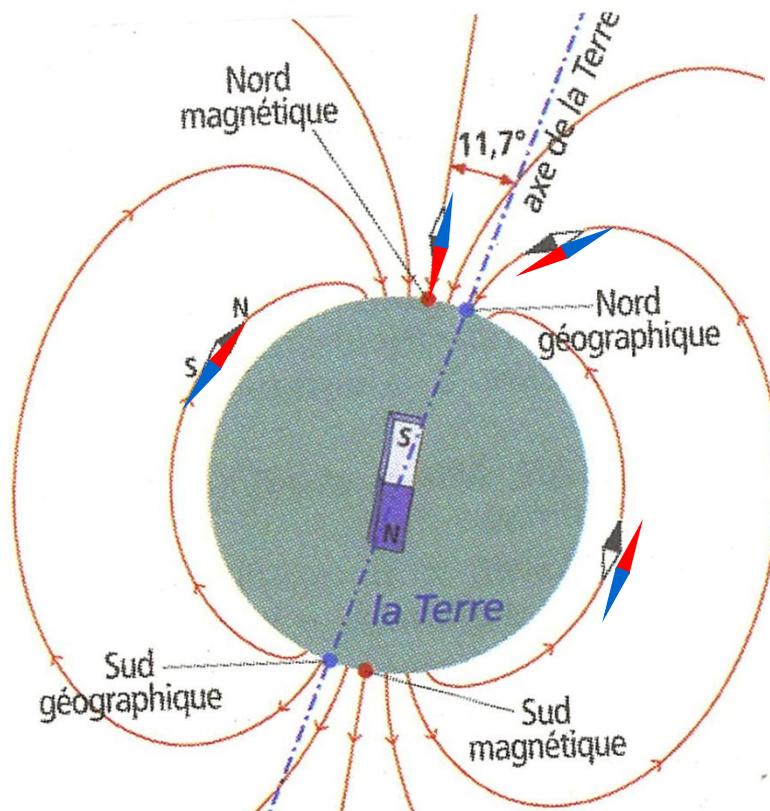
Aimant droit



Câble électrique



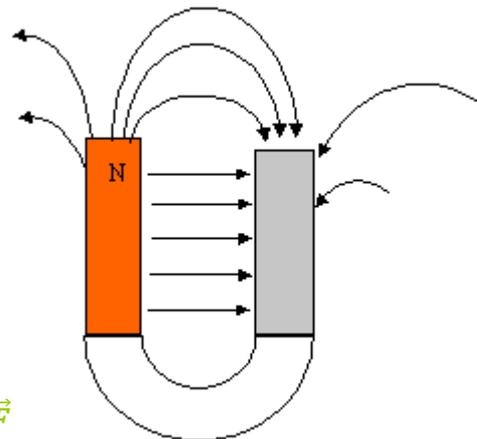
Champ terrestre
« géomagnétique »





Champs uniformes à l'intérieur d'un solénoïde ou dans l'entrefer d'un aimant en U.

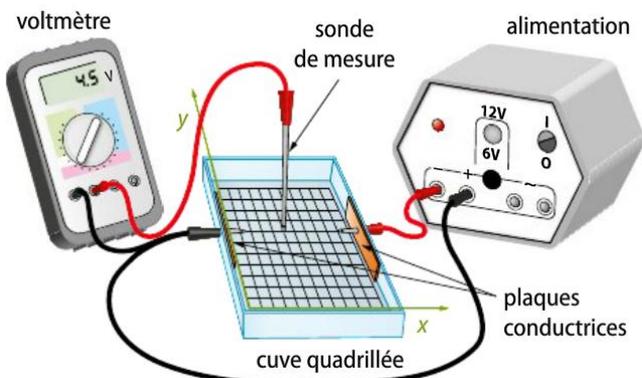
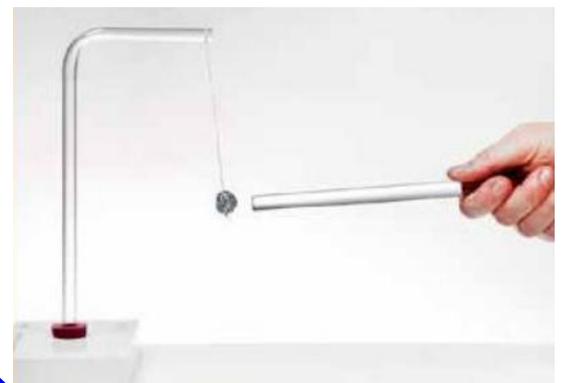
Le champ magnétique est un champ vectoriel.



2.3. Champ électrostatique : $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$

Entre deux objets chargés, il existe un champ électrostatique.

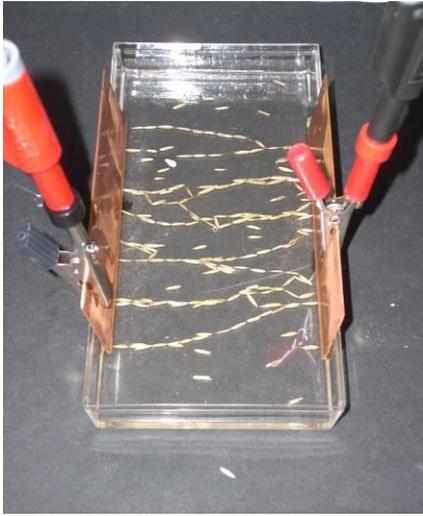
Il est noté \vec{E} et s'exprime en Volts par mètres $V.m^{-1}$.



TP

$$\vec{E}_{\text{disruptif de l'air}} = 3600 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$$

Lorsque ce champ vectoriel est créé à proximité d'un objet électrisé, Celui-ci est attiré ou repoussé. Le champ électrostatique \vec{E} crée donc une force électrostatique \vec{F} sur cet objet. Le sens de \vec{F} dépend du signe de la charge q : $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$



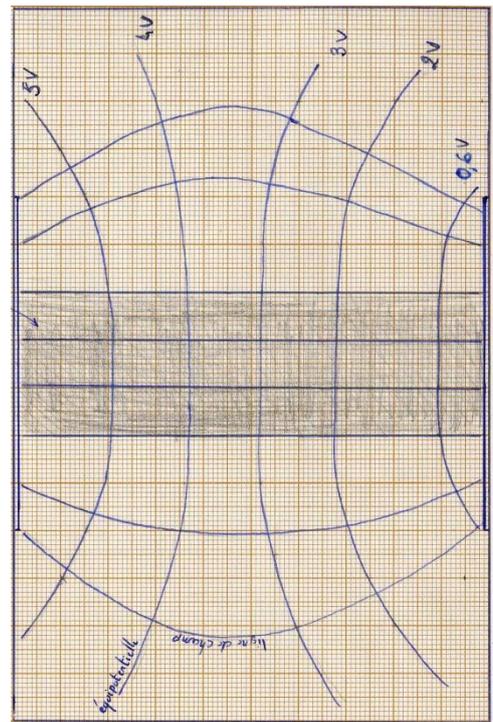
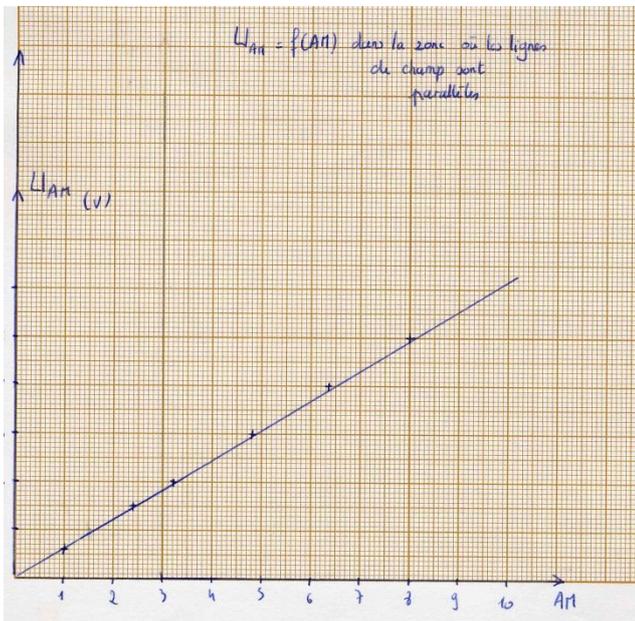
Champ de deux plaques chargées



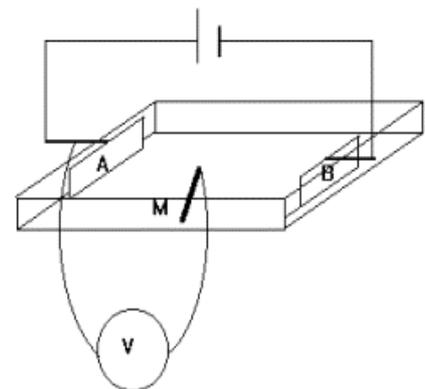
Champ d'un fil et un anneau

Spectres de champs électrostatiques

TP



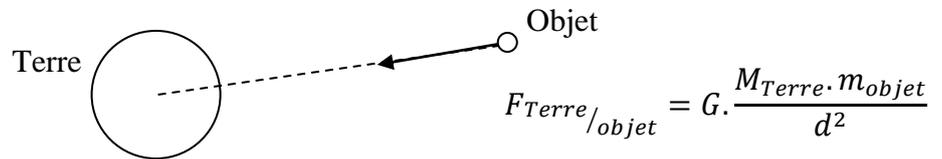
$$E = \frac{U_{AM}}{x}$$



2.4. Champ de pesanteur local : $\vec{g} = \frac{\vec{P}}{m}$

⇒ Étude du champ de gravitation

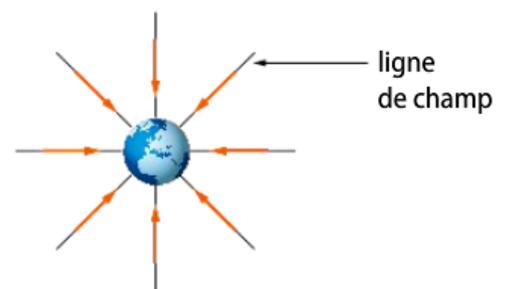
Deux objets massiques A et B exercent l'un sur l'autre une force gravitationnelle : $F = G \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{d^2}$



Le champ de gravitation \vec{G} est tel que : $\vec{G} = \frac{\vec{F}}{m_{objet}}$ donc $\mathcal{G} = G \cdot \frac{M_{Terre}}{d^2}$

Au niveau du sol : $\mathcal{G} = G \cdot \frac{M_{Terre}}{R_T^2}$

Le champ gravitationnel est vectoriel et toutes les lignes de champ sont orientées vers le centre de l'objet qui est à l'origine de ce champ.



⇒ Champ de pesanteur

Le poids d'un objet noté \vec{P} correspond à l'action mécanique provoquée par ce champ de pesanteur.

$$\vec{P} = m_{objet} \cdot \vec{g}$$

Le poids peut être assimilé à la force gravitationnelle en première approximation : $\vec{P} = \vec{F}$ (mais du fait de la rotation de la Terre, il y a un petit décalage dû à une contribution dite « centrifuge »)

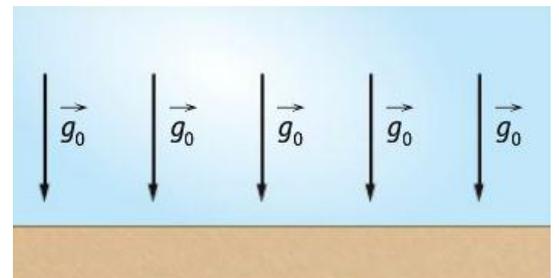
Donc :

$$\vec{G} = \frac{\vec{F}}{m_{objet}} = \frac{\vec{P}}{m_{objet}} = \vec{g}$$

Pour la Terre et au niveau du sol :

$$g = \mathcal{G} = G \cdot \frac{M_{Terre}}{R_T^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{5,98 \cdot 10^{24}}{(6375 \cdot 10^3)^2} = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Le champ de pesanteur local \vec{g} est **uniforme** et **vectoriel** orienté vers le centre de la Terre.



3. Formes et principe de conservation de l'énergie

COMPRENDRE

Lois et modèles

Quelles sont les causes physiques à l'œuvre dans Univers ? Quelles interactions expliquent à la fois les stabilités et les évolutions physiques et chimiques de la matière ? Quels modèles utilise-t-on pour les décrire ? Quelles énergies leur sont associées ?

Cohésion et transformations de la matière

La matière à différentes échelles : du noyau à la galaxie.	Connaître les ordres de grandeur des dimensions des différentes structures des édifices organisés.
Particules élémentaires : électrons, neutrons, protons. Charge élémentaire e .	Connaître l'ordre de grandeur des valeurs des masses d'un nucléon et de l'électron. Savoir que toute charge électrique peut s'exprimer en fonction de la charge élémentaire e .
Interactions fondamentales : interactions forte et faible, électromagnétique, gravitationnelle.	Associer, à chaque édifice organisé, la ou les interactions fondamentales prédominantes.
Cohésion du noyau, stabilité.	Utiliser la représentation symbolique A_ZX ; définir l'isotopie et reconnaître des isotopes.
Radioactivité naturelle et artificielle. Activité.	Recueillir et exploiter des informations sur la découverte de la radioactivité naturelle et de la radioactivité artificielle.
Réactions de fission et de fusion.	Connaître la définition et des ordres de grandeur de l'activité exprimée en becquerel. Utiliser les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire.
Lois de conservation dans les réactions nucléaires.	Utiliser la relation $E_{\text{libérée}} = \Delta m c^2$.
Défaut de masse, énergie libérée. Réactions nucléaires et aspects énergétiques associés. Ordre de grandeur des énergies mises en jeu. Solide ionique. Interaction électrostatique ; loi de Coulomb. Solide moléculaire. Interaction de Van der Waals, liaison hydrogène. Électronégativité.	Recueillir et exploiter des informations sur les réactions nucléaires (domaine médical, domaine énergétique, domaine astronomique, etc.). Interpréter la cohésion des solides ioniques et moléculaires. Réaliser et interpréter des expériences simples d'électrisation.
Effet du caractère polaire d'un solvant lors d'une dissolution.	Recueillir et exploiter des informations sur les applications de la structure de certaines molécules (super absorbants, tensioactifs, alginates, etc.). Prévoir si un solvant est polaire.

<p>Conservation de la matière lors d'une dissolution.</p> <p>Variation de température et transformation physique d'un système par transfert thermique.</p> <p>Nomenclature des alcanes et des alcools ; formule semi-développée.</p> <p>Lien entre les températures de changement d'état et la structure moléculaire dans le cas de l'eau, des alcools et des alcanes. Miscibilité des alcools avec l'eau.</p> <p>Réactions chimiques et aspects énergétiques associés : énergie libérée lors de la combustion d'un hydrocarbure ou d'un alcool ; ordres de grandeur.</p>	<p>Écrire l'équation de la réaction associée à la dissolution dans l'eau d'un solide ionique. Savoir qu'une solution est électriquement neutre.</p> <p><i>Élaborer et réaliser un protocole de préparation d'une solution ionique de concentration donnée en ions.</i></p> <p><i>Mettre en œuvre un protocole pour extraire une espèce chimique d'un solvant.</i></p> <p>Interpréter à l'échelle microscopique les aspects énergétiques d'une variation de température et d'un changement d'état.</p> <p><i>Pratiquer une démarche expérimentale pour mesurer une énergie de changement d'état.</i></p> <p>Reconnaître une chaîne carbonée linéaire, ramifiée ou cyclique. Nommer un alcane et un alcool.</p> <p>Donner les formules semi-développées correspondant à une formule brute donnée dans le cas de molécules simples.</p> <p>Interpréter :</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'évolution des températures de changement d'état au sein d'une famille de composés ; - les différences de température de changement d'état entre les alcanes et les alcools ; - la plus ou moins grande miscibilité des alcools avec l'eau. <p><i>Réaliser une distillation fractionnée.</i></p> <p>Écrire une équation de combustion.</p> <p><i>Mettre en œuvre un protocole pour estimer la valeur de l'énergie libérée lors d'une combustion.</i></p>
---	---

Champs et forces

<p>Exemples de champs scalaires et vectoriels : pression, température, vitesse dans un fluide.</p> <p>Champ magnétique : sources de champ magnétique (Terre, aimant, courant).</p>	<p>Recueillir et exploiter des informations (météorologie, téléphone portable, etc.) sur un phénomène pour avoir une première approche de la notion de champ.</p> <p>Décrire le champ associé à des propriétés physiques qui se manifestent en un point de l'espace.</p> <p>Comprendre comment la notion de champ a émergé historiquement d'observations</p>
--	--

<p>Champ électrostatique : $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$</p> <p>Champ de pesanteur local : $\vec{g} = \frac{\vec{P}}{m}$</p> <p>Loi de la gravitation ; champ de gravitation. Lien entre le champ de gravitation et le champ de pesanteur.</p>	<p>expérimentales.</p> <p><i>Pratiquer une démarche expérimentale pour cartographier un champ magnétique ou électrostatique.</i></p> <p>Connaître les caractéristiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> - des lignes de champ vectoriel ; - d'un champ uniforme ; - du champ magnétique terrestre ; - du champ électrostatique dans un condensateur plan ; - du champ de pesanteur local. <p>Identifier localement le champ de pesanteur au champ de gravitation, en première approximation.</p>
--	---

Formes et principe de conservation de l'énergie

<p>Énergie d'un point matériel en mouvement dans le champ de pesanteur uniforme : énergie cinétique, énergie potentielle de pesanteur, conservation ou non conservation de l'énergie mécanique.</p> <p>Frottements ; transferts thermiques ; dissipation d'énergie.</p> <p>Formes d'énergie</p> <p>Principe de conservation de l'énergie. Application à la découverte du neutrino dans la désintégration β.</p>	<p>Connaître et utiliser l'expression de l'énergie cinétique d'un solide en translation et de l'énergie potentielle de pesanteur d'un solide au voisinage de la Terre.</p> <p><i>Réaliser et exploiter un enregistrement pour étudier l'évolution de l'énergie cinétique, de l'énergie potentielle et de l'énergie mécanique d'un système au cours d'un mouvement.</i></p> <p>Connaître diverses formes d'énergie.</p> <p>Exploiter le principe de conservation de l'énergie dans des situations mettant en jeu différentes formes d'énergie.</p>
--	---