

Chapitre 1

IDENTIFICATION DE LA MATIERE ET DE L'ENERGIE

L'univers physique résulte de deux composantes fondamentales, à savoir : la matière et l'énergie.

I. IDENTIFICATION DE LA MATIERE

La matière est la substance qui forme le corps d'un objet et de tout être vivant animal ou végétal.

En physique, la **masse** d'un corps est la quantité de matière de ce corps.

Dans le système international (SI) l'unité de masse est le kilogramme (kg).

1 LES ETATS DE LA MATIERE

Dans certaines conditions de température et de pression, la matière peut se trouver sous forme de trois états différents à savoir :

- **l'état solide** : la matière présente un volume propre avec des dimensions déterminées.

Exemple : l'eau à la température de 0°C et à la pression normale est solide et appelée communément de la glace.

- **l'état liquide** : la matière n'a pas de forme propre, elle prend celle du récipient qui la contient.

Exemple : l'eau liquide dans un verre prend la forme interne de ce verre.

- **l'état gazeux** : la matière n'a pas de forme propre, elle est expansible et occupe tout le volume disponible.

Exemple : à la pression normale et à la température de 100°C, l'eau est à l'état gazeux sous forme de vapeur.

2. LA MATIERE ELECTRISEE

Un corps est électriquement chargé s'il attire puis repousse un autre corps.

Expérience de mise en évidence d'un corps électriquement chargé

La matière plastique d'un stylo bic, frottée avec un tissu rugueux et sec attire puis repousse des petits morceaux de papier sec. Cette matière plastique est électrisée par frottement.

L'expérience montre que deux corps électrisés, rapprochés l'un de l'autre, peuvent s'attirer ou se repousser. Ce fait montre qu'il existe des charges électriques de signes différents à savoir :

- des charges électriques positives (notées +) et

- des charges électriques négatives (notées -).

Par convention, le verre frotté porte des charges (+) tandis que l'ébonite frottée porte des charges (-).

L'expérience montre que deux corps ayant des charges électriques de même signe [(+,+) ou (-,-)] se repoussent mais s'attirent si les charges sont de signes opposés [(+,-) ou (-,+)] (figure 1).

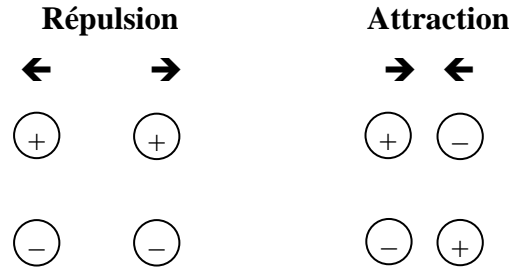


Figure 1.

L'unité de charge électrique dans le SI est le Coulomb (C).

La plus petite charge électrique (positive ou négative) d'un corps vaut en valeur absolue $1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Par définition, on appelle charge élémentaire la quantité $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Si on désigne par n un nombre entier ($n = 1, 2, 3, \dots$), la charge d'un corps positif est $q = + n \cdot e$ et celle d'un corps négatif est $q = - n \cdot e$.

Un corps électriquement neutre a une charge $q = 0$.

Loi de conservation de la charge électrique

Lorsqu'un système de corps électriquement chargés évolue entre un état initial [i] et un état final [f], cette évolution s'effectue avec conservation de la charge électrique totale du système.

$$\left[\sum \text{alg} q \right]_i = \left[\sum \text{alg} q \right]_f \quad [1]$$

Somme algébrique des charges q dans [i] = Somme algébrique des charges q dans [f]

Remarque :

Pourquoi somme algébrique ? car il y a des charges électriques positives et des charges électriques négatives.

Exercice :

L'interaction de trois corps de charges initiales respectives $q_1 = +e$, $q_2 = -6e$ et $q_3 = +4e$ conduit à un état final comportant deux corps de charges respectives $q_4 = -5e$ et q_5 inconnue.

Déterminer q_5 .

La loi de conservation de la charge électrique [1] permet d'écrire :

$$\begin{aligned} q_1 + q_2 + q_3 &= q_4 + q_5 \\ [e - 6e + 4e]_i &= [-5e + q_5]_f \end{aligned} \quad \Rightarrow q_5 = +4e$$

3. LA MATIERE AIMANTEE

Certaines substances comme les minerais de fer, de cobalt ou de manganèse ont la propriété d'attirer et de maintenir en contact des clous en fer (ou de la limaille de fer). De tels minerais sont appelés des substances aimantées. Un corps constitué d'une matière aimantée est un aimant.

Un aimant sous forme d'un barreau, d'un fer à cheval ou d'une aiguille attire par ses extrémités la limaille de fer. L'expérience montre que deux aimants d'un même minerais s'attirent ou se repoussent au niveau de leurs extrémités. Ce fait montre que les extrémités d'un aimant sont différentes : l'une est appelée pôle nord (N) et l'autre pôle sud (S).

Deux pôles de même nom se repoussent et deux pôles de noms différents s'attirent et restent en contact (figure 2).

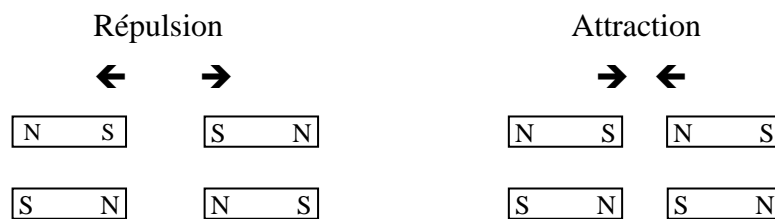


Figure 2.

Expérience de l'aimant brisé

Un aimant plusieurs fois brisé produit toujours des aimants avec chacun un pôle (N) et un pôle (S). Ce fait montre qu'il est impossible d'isoler le pôle d'un aimant car la matière aimantée est une propriété de l'atome*.

4. LES DIMENSIONS D'UN CORPS

Dans le système international, une dimension telle celle d'une longueur, largeur, hauteur ou une épaisseur est mesurée en mètre [m], une surface (produit de deux dimensions) en m^2 et un volume (produit de trois dimensions) en m^3 .

Du point de vue dimension on distingue :

- les corps macroscopiques
- les corps microscopiques
- les corps subatomiques

4.1 Corps macroscopique :

C'est un corps visible à l'oeil nu. L'expérience montre qu'un oeil normal d'un adulte voit séparément les extrémités A et B d'un objet placé à la distance minimale de vision distincte $d_m = 25 \text{ cm}$ si $AB > 75 \mu\text{m}$ (fig.3).

Si $AB < 75 \mu\text{m}$, l'oeil confond A et B en un seul point.

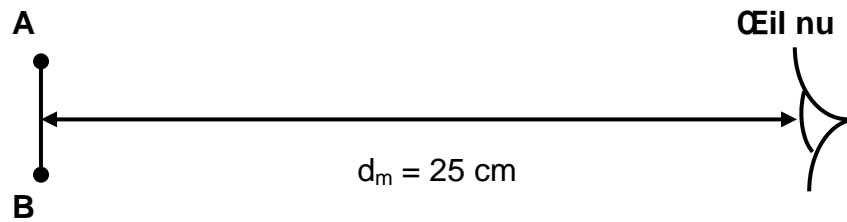


Figure 3.

La capacité de l'œil à distinguer séparément deux points A et B est donc limitée. On définit alors le pouvoir séparateur d'un œil normal comme étant la distance limite $\delta = 75 \mu\text{m}$.

4.2 Corps microscopique :

C'est un corps invisible à l'œil nu ; seule est visible son image agrandie à l'aide d'appareils grossissants comme le microscope optique ($\delta = 0,2 \mu\text{m}$.) et le microscope électronique ($\delta \approx 1 \text{Å}$).

Exemples de corps microscopiques

Cellule animale	virus	bactérie	ADN
50 μm	< 250nm	> 250nm	largeur (double hélice): 2 nm

4.3 Corps subatomique :

C'est un corpuscule (ou particule) invisible même à l'aide d'appareils grossissants les plus perfectionnés. Les particules subatomiques ont des dimensions très inférieures à 10^{-10} m et des masses inférieures à 10^{-27} kg.

L'existence des corpuscules subatomiques est mise en évidence grâce aux phénomènes physiques, chimiques ou biologiques qu'ils engendrent lors de leur interaction avec la matière. De cette interaction résultent des effets observables et mesurables permettant de détecter et d'identifier ces corpuscules.

Exemple :

Le monoxyde de carbone (gaz invisible, inodore, incolore et sans saveur) est constitué de corpuscules subatomiques (molécules CO) qui, respirés accidentellement par un sujet, interagissent avec les globules rouges, réduisent ainsi l'apport d'oxygène utilisable par ces globules et entraînent le plus souvent la mort du sujet.

Remarque :

Etant donné les dimensions infiniment petites des corpuscules subatomiques il s'agit de savoir si les lois de la physique des corps macroscopiques telles les lois de la gravitation, de

Coulomb, de l'électromagnétisme, de la conservation de la matière: $[\Sigma m]_i = [\Sigma m]_f$ et celle de l'énergie : $[\Sigma E]_i = [\Sigma E]_f$ sont encore valables dans l'univers subatomique.

Un des objectifs de la Physique de l'Atome est justement de mettre en évidence les phénomènes physiques subatomiques et leurs lois spécifiques qui permettent de montrer les limites de validité des lois qui régissent l'univers des corps macroscopiques.

5. STRUCTURE ATOMIQUE ET MOLECULAIRE DE LA MATIERE

5.1 structure atomique de la matière

La matière paraît continue à l'œil nu. En réalité elle est discontinue et constituée de corpuscules subatomiques : le plus petit corpuscule de matière s'appelle **un atome**.

Dans la nature, il existe quatre-vingt-douze variétés d'atomes appelés les 92 éléments naturels. L'atome le plus léger est appelé hydrogène (noté H) et le plus lourd : uranium (U).

Symbole d'un atome : un atome est représenté par une lettre majuscule d'imprimerie de la forme X ou Xx.

Exemples :

H, He et U sont les symboles respectivement de l'élément hydrogène, hélium et uranium

5.2 structure moléculaire de la matière

Des atomes identiques, ou bien différents, peuvent se combiner et se lier pour former un corpuscule subatomique, plus lourd, appelé molécule.

La matière peut être, selon sa composition moléculaire : simple, composée ou bien constituée d'un mélange de molécules différentes.

- **La matière simple** comporte des d'atomes identiques ; ces atomes sont soit isolés (matière monoatomique) soit liés (matière moléculaire).

Exemples :

Matière simple avec des atomes isolés :

Les gaz rares : He (hélium), Ne (Néon) ; Ar (argon) ; Kr (krypton) ; Rn (radon)

Les métaux à l'état vapeur : Cu (cuivre) ; Fe (fer) ; Au (or)

Matière simple avec des atomes liés :

Les gaz moléculaires : H₂ (hydrogène) ; N₂ (azote) ; O₂ (oxygène) ; Cl₂ (chlore) ;

O₃ (ozone).

- **La matière composée** comporte des molécules identiques constituées d'atomes différents.

Exemples :

H₂O (eau quel que soit son état) ; CO₂ (dioxyde de carbone) ; NaCl (chlorure de sodium) ;

C₆H₆ (benzène).

-**Le mélange** est constitué de diverses molécules simples et composées.

Exemples :

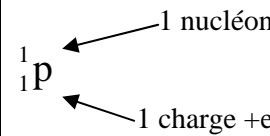
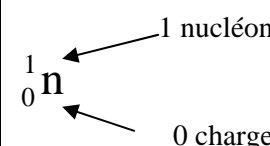
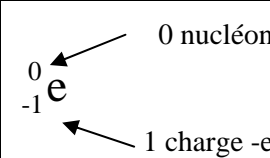
L'air (N₂+O₂+H₂O+gas rares) ; eau de mer (H₂O+NaCl+Fe+Mn+...)

6. CONSTITUANTS ET STRUCTURE DE L'ATOME

6.1. les constituants de l'atome

L'atome est construit à partir de trois particules subatomiques fondamentales : le proton, le neutron et l'électron dont les caractéristiques sont consignées dans le tableau 1 :

Tableau 1

Nom du constituant	Autre nom	Masse en kg	Charge en Coulomb (C)	Notation
Proton	Un nucléon	$1,67110^{-27}$	+ e	${}^1_1\text{p}$ 
Neutron	Un nucléon	$1,674 \cdot 10^{-27}$	0	${}^1_0\text{n}$ 
Electron	L'électron n'est pas un nucléon	$9,110^{-31}$	- e	${}^0_{-1}\text{e}$ 

Remarque :

L'électron peut être noté plus simplement par e^- .

6.2. Structure de l'atome : L'atome comporte deux espaces différents appelés respectivement noyau atomique et cortège électronique

6.2.1. Le noyau atomique où se concentrent en un très petit volume les protons et les neutrons, occupe l'espace central de l'atome

Les paramètres caractéristiques d'un noyau atomique sont consignés dans le tableau 2 :

Tableau 2

Nom du paramètre	Numéro atomique	Nombre de neutrons	Nombre de masse
Signification	Nombre de protons	Nombre de neutrons	Nombre total de nucléons
Notation	Z	N	$A = Z + N$

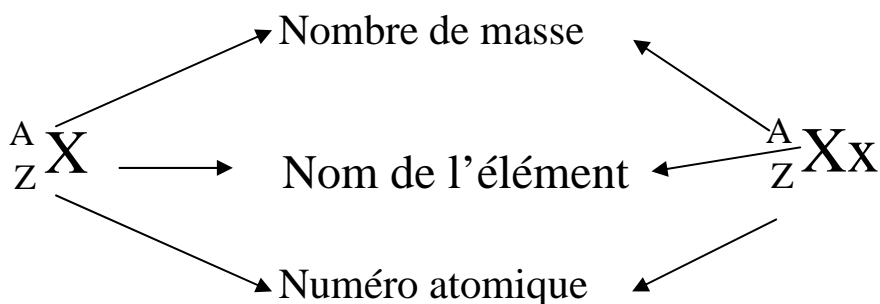
Charge électrique nucléaire : $q_N = +Ze$

Rayon du noyau : $R = R_0 A^{1/3}$ où $R_0 = 1,4$ fermi

[1 fermi = 1femtomètre (fm) = 10^{-15} m]

Symbole d'un noyau atomique : ${}^A_Z\text{X}$ ou ${}^A_Z\text{X}$.

On appelle **nucléide** un noyau atomique dont le numéro atomique Z et le nombre de masse A sont connus.



Dénomination d'un nucléide : on nomme l'atome X ou Xx suivi du nombre de masse A.

Exemples :

Nom du nucléide	Z	N	A = Z + N	Symbole du nucléide
Hydrogène 1	1	0	1	^1_1H
Hélium 4	2	2	4	^4_2He
Carbone 12	6	6	12	$^{12}_6\text{C}$
Carbone 14	6	8	14	$^{14}_6\text{C}$
Azote 14	7	7	14	$^{14}_7\text{N}$
Oxygène 16	8	8	16	$^{16}_8\text{O}$
Uranium 238	92	146	238	$^{238}_{92}\text{U}$

Remarque:

A chaque lettre majuscule d'imprimerie X (ou Xx) correspond un seul numéro atomique Z. Dans l'écriture ^A_ZX , Z peut être omis et le symbole du nucléide peut s'écrire ^AX

Exemple : ^{12}C , ^{14}N .

6.2.2. Cortège électronique ou nuage électronique :

Le cortège électronique est l'espace extranucléaire occupé par les électrons. Pour un atome électriquement neutre ($q_X = 0$), le nombre d'électrons est égal au nombre de protons de manière que : $q_X = -Ze + Ze = 0$.

On appelle ion atomique ou atome ionisé un atome ayant perdu ou gagné un ou plusieurs électrons.

- Un cation est un ion positif déficitaire en électrons : Na^+ ; Cu^{2+} .
- Un anion est un ion négatif excédentaire en électrons : Cl^- ; O^{2-} .

Dans une cuve à électrolyse munie de 2 électrodes les anions (-) sont attirés par l'électrode positive appelée anode et les cations (+) sont attirés par l'électrode négative appelée cathode. L'anode (+) attire donc les anions (-) et la cathode (-) attire les cations (+).

Remarque :

Le noyau atomique et le cortège électronique présentent une structure respectivement pour les nucléons et pour les électrons (voir concept de quantification de l'espace atomique : Chapitre IV).

7. NOMENCLATURE DES ATOMES

Dans ce paragraphe sont définis les noms spécifiques des atomes.

7.1. Les isotopes : sont des atomes dont les noyaux ont le même nombre de protons mais des nombres de neutrons différents.

Les isotopes ont donc le même numéro atomique Z et des nombres de masse $A = Z + N$ différents.

Exemples :

- Les isotopes de l'hydrogène ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ (deutéron ou deuton), ${}^3_1\text{H}$ (triton)
- Les isotopes du carbone ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{14}_6\text{C}$
- Les isotopes de l'uranium ${}^{238}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{234}_{92}\text{U}$

7.1.1 Propriétés chimiques des isotopes

Le numéro atomique Z des isotopes étant le même, ces isotopes ont alors des cortèges électroniques similaires et donnent donc les mêmes combinaisons chimiques avec les mêmes atomes. Les isotopes ont donc des propriétés chimiques identiques.

Exemple : ${}^1\text{H}_2\text{O}$ (eau légère), ${}^2\text{H}_2\text{O}$ (eau lourde), ${}^3\text{H}_2\text{O}$ (eau tritiée)

**Remarque :**

Dans l'écriture d'une molécule, ne pas confondre le chiffre qui représente le nombre de masse A de l'isotope et celui relatif au nombre d'atomes de la molécule.

Exemple : ${}^3\text{H}_2\text{O}$: 3 est le nombre de masse A du triton ${}^3\text{H}$

2 est le nombre d'atomes ${}^3\text{H}$ dans la molécule ${}^3\text{H}_2\text{O}$

7.1.2. Propriétés physiques des isotopes

Du fait d'avoir des nombres de masse A différents les isotopes ont donc leurs paramètres physiques différents, à savoir : des masses atomiques, densités, chaleurs massiques, températures d'ébullition et de solidification différentes.

7.1.3. Détermination de l'abondance isotopique d'un isotope

L'expérience montre que, dans la nature, les isotopes d'un élément n'ont pas la même abondance. En d'autres termes, dans la matière terrestre le nombre d'atomes de chaque isotope d'un élément est constant mais différent des autres isotopes de cet élément.

On appelle **abondance isotopique** (notée θ) le nombre d'atomes d'un isotope dans un mélange de cent atomes isotopes naturels du même élément.

L'abondance isotopique peut être calculée à l'aide de la relation :

$$\theta_{\text{isotope}} = \frac{N_{\text{isotope}}}{\sum N_{\text{isotope}}} \times 100 \Rightarrow \theta \text{ en } \%$$

Dans un échantillon de matière contenant plusieurs isotopes d'un même élément, N_{isotope} est le nombre d'atomes d'un isotope et $\sum N_{\text{isotope}}$ le nombre total des atomes isotopes contenus dans l'échantillon.

Exemple :

Dans une roche uranifère contenant les isotopes ^{238}U , ^{235}U et ^{234}U , les nombres d'atomes N_{238} , N_{235} et N_{234} , obtenus par extraction chimique de l'uranium puis séparation des isotopes à l'aide d'un spectromètre de masse sont différents.

Posons $\sum N_{\text{isotope}} = N_{\text{U}} = N_{238} + N_{235} + N_{234}$

Dans les roches uranifères terrestres les abondances isotopiques des isotopes de l'uranium déterminées expérimentalement sont les suivantes:

$$\theta_{238} = \frac{N_{238}}{N_{\text{U}}} \times 100 = 99,294 \text{ \%} ; \quad \theta_{235} = \frac{N_{235}}{N_{\text{U}}} \times 100 = 0,7 \text{ \%} ; \quad \theta_{234} = \frac{N_{234}}{N_{\text{U}}} \times 100 = 0,006 \text{ \%}$$

Ces valeurs montrent que l'isotope le plus abondant est l'uranium 238.

Remarque :

Une abondance isotopique avec une virgule exprime uniquement le rapport de nombres expérimentaux entiers : $\frac{N_{238}}{N_{\text{U}}}$, $\frac{N_{235}}{N_{\text{U}}}$, $\frac{N_{234}}{N_{\text{U}}}$ et ne signifie donc pas des fractions d'atomes.

L'abondance isotopique θ est un paramètre pratique qui permet de se rendre compte rapidement de l'isotope le plus ou le moins abondant dans la nature.

7.2 Les isotones : sont des atomes dont les noyaux comportent le même nombre de neutrons : $N=A-Z$.

Exemple :

$^{13}_6\text{C}$ et $^{14}_7\text{N}$ sont des isotones de même nombre de neutrons : $N=13-6=14-7=7$ neutrons .

7.3. Les isobares sont des atomes dont les noyaux comportent le même nombre de nucléons donc le même nombre de masse A .

Exemples :

^3_1H et ^3_2He ; $^{14}_6\text{C}$ et $^{14}_7\text{N}$

Les isotones et les isobares ont des propriétés chimiques et physiques différentes.

7.4 Les atomes radioactifs

Un atome est radioactif si son noyau émet spontanément un rayonnement constitué d'un corpuscule [appelé alpha (α), bêta (β)] ou d'une onde électromagnétique appelée gamma (γ).

Un atome radioactif comporte donc un noyau instable dit noyau radioactif, radionucléide, radioisotope ou radioélément.

Un radionucléide est symbolisé par ${}^A_Z X$ car un noyau qu'il soit stable ou instable contient un nombre Z de protons, un nombre N de neutrons et un nombre total de nucléons $A = Z + N$.

La **radioactivité** est la propriété d'un noyau atomique instable qui se manifeste par l'émission d'un rayonnement appelé rayonnement de radioactivité. La radioactivité étant un phénomène nucléaire **spontané**, aucune cause physique, chimique ou biologique ne peut donc l'arrêter, l'accélérer ou la retarder. Si l'Homme est capable de provoquer artificiellement la radioactivité de noyaux stables par contre il ne possède aucun moyen pour arrêter la radioactivité naturelle ou artificielle.

7.4.1. Identification des rayonnements α , β , γ

Il existe différents types d'instabilités nucléaires dont les plus connues sont appelées radioactivité alpha, bêta moins (β^-), bêta plus (β^+), capture électronique (C.E.) et gamma. [Identification figure 4 et figure 4'].

Identification des rayonnements α , β , γ

a) à l'aide du pouvoir de pénétration dans la matière

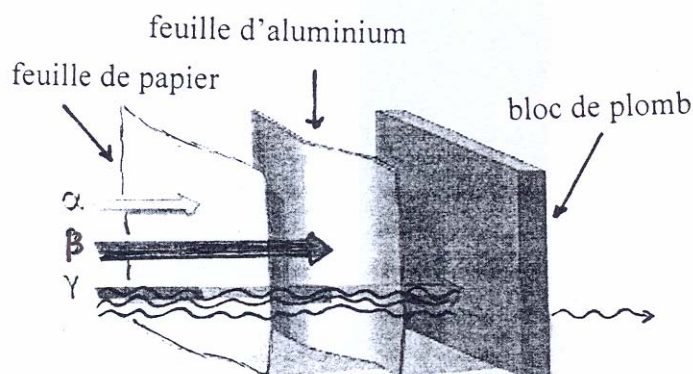


Figure 4

Les rayonnements α sont absorbés par une feuille de papier

Les rayonnements β sont absorbés par une feuille d'aluminium

Les rayonnements γ sont partiellement absorbés (ou atténués) par du plomb.

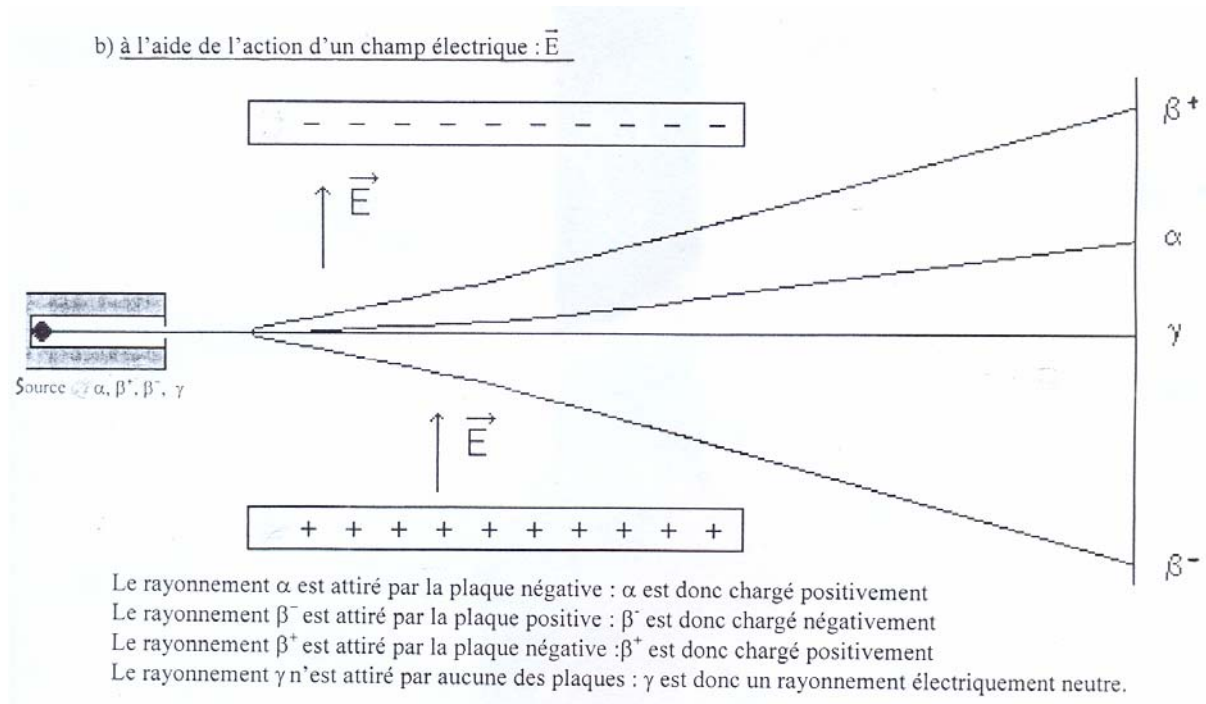


Figure 4'

Remarque

- On désigne par radioactivité bêta (β) les trois instabilités nucléaires β^- , β^+ et CE.
- Les rayonnements β^- , β^+ , $\bar{\nu}$ (antineutrino), ν (neutrino) et γ ne sont pas des nucléons.
- β^- et β^+ ont la même masse au repos que l'électron. $m_{\beta^-} = m_{\beta^+} = m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg.
- Les rayonnements corpusculaires de radioactivité sont émis hors de l'atome avec une vitesse v tandis que les rayonnements électromagnétiques γ sont émis avec la vitesse $c = 3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹.

7.4.2. Ecriture d'une désintégration nucléaire :

Lorsqu'un radionucléide émet spontanément un rayonnement on dit qu'il se désintègre. Ce phénomène physique est appelé désintégration nucléaire. Une désintégration nucléaire représente l'évolution d'un radionucléide ${}^A_Z X$ entre un état initial [i] (état de ${}^A_Z X$ avant sa désintégration) et un état final [f] (état après désintégration de ${}^A_Z X$). Le passage de [i] vers [f] s'effectue avec émission d'un rayonnement R et existence d'un noyau résiduel Y. Une désintégration nucléaire est représentée par l'écriture suivante :



Cette écriture se lit : ${}^A_Z X$ donne par désintégration R+Y

Tableau 3 :définition et caractéristiques des rayonnements α , β , γ

Nom de l'instabilité nucléaire	Définition	Caractéristique des rayonnements émis		Identification
		Masse	charge	
α	Emission d'une particule α	$m_\alpha = 4 \text{ u.m}$	$q_\alpha = +2e$	α est un noyau ${}^4_2\text{He}$
β^-	Emission de deux rayonnements simultanés : une particule β^- et un antineutrino $\bar{\nu}$	$m_{\beta^-} = 9.10^{-31}\text{kg}$ $m_{\bar{\nu}}$ très faible	$q_{\beta^-} = -e$ $q_{\bar{\nu}} = 0$	β^- est identique à un électron (e^-) et à un négaton (e^-)
β^+	Emission de deux rayonnements simultanés : une particule β^+ et un antineutrino ν	$m_{\beta^+} = 9.10^{-31}\text{kg}$ m_ν très faible	$q_{\beta^+} = +e$ $q_\nu = 0$	β^+ est identique à un positon (e^+)
par capture électronique (CE)	La CE : capture d'un électron de la couche K ou L par le noyau du même atome avec émission d'un neutrino ν (figure 5).	m_ν très faible	$q_\nu = 0$	ν émis lors de la CE est identique au ν émis dans l'émission β^+
γ	Emission d'un rayonnement électromagnétique γ par ${}^A_Z\text{X}$	$m_\gamma = 0$	$q_\gamma = 0$	Les rayons γ sont de même nature que les rayons lumineux.

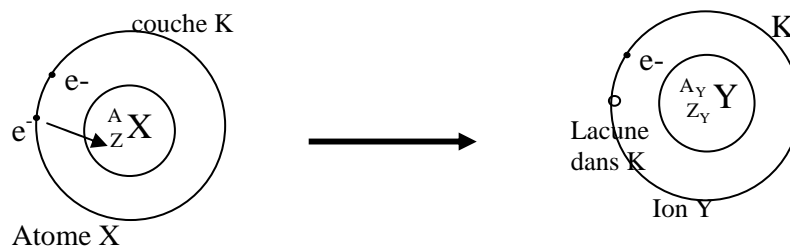


Figure 5. : Schématisation de la capture électronique

Ecrire une désintégration nucléaire revient à identifier X, R et Y. Pour identifier un de ces trois corpuscules, il faut connaître les deux autres et appliquer les lois de conservation suivantes :

(1) Loi de conservation de la charge électrique entre [i] et [f] :

$$\left[\sum \text{alg des charges} \right]_i = \left[\sum \text{alg des charges} \right]_f \quad [1]$$

(2) Loi de conservation du nombre total de nucléons A entre [i] et [f] :

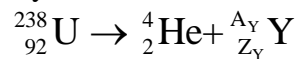
$$\left[\sum A \right]_i = \left[\sum A \right]_f \quad [2]$$

Ces deux lois appliquées à la désintégration ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_R R + {}^A_Y Y$ s'écrivent :

$$- \quad Z_X e = Z_R e + Z_Y e \quad \text{et} \quad A_X = A_R + A_Y$$

Exemple :

identification du noyau résiduel Y dans la désintégration nucléaire suivante :



Les lois de conservation [1] [2] permettent d'écrire

$$\begin{cases} 92e = 2e + Z_Y e \\ 238 = 4 + A_Y \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Z_Y = 90 \\ A_Y = 234 \end{cases}$$

$$\text{donc } {}^A_{Z_Y} \text{Y} = {}^{234}_{90} \text{Th}$$

7.4.3. Ecriture des désintégrations α , β^- , β^+ , CE et γ

Sachant que les rayonnements β^- , β^+ , $\bar{\nu}$, ν et γ ne sont pas des nucléons et en tenant compte du tableau 3 et des lois de conservation de la charge électrique et du nombre de nucléons, l'écriture des désintégrations nucléaires est donc la suivante (tableau 4) :

Tableau 4

Nom de la désintégration du radionucléide ${}^A_Z X$	Ecriture [$Z_X = Z$, $A_X = A$]	Exemple
Alpha (α)	${}^A_Z X \rightarrow {}^4_2 \text{He} + {}^{A-4}_{Z-2} Y$	${}^{235}_{92} \text{U} \rightarrow {}^4_2 \text{He} + {}^{231}_{90} \text{Th}$
Béta moins (β^-)	${}^A_Z X \rightarrow \beta^- + \bar{\nu} + {}^A_{Z+1} Y$	${}^{14}_6 \text{C} \rightarrow \beta^- + \bar{\nu} + {}^{14}_7 \text{N}$
Béta plus (β^+)	${}^A_Z X \rightarrow \beta^+ + \nu + {}^A_{Z-1} Y$	${}^{48}_{23} \text{V} \rightarrow \beta^+ + \nu + {}^{48}_{22} \text{Ti}$
Capture électronique (CE)	${}^A_Z X + e^- \rightarrow \nu + {}^A_{Z-1} Y$	${}^{48}_{23} \text{V} + e^-_{\text{K}} \rightarrow \nu + {}^{48}_{22} \text{Ti}$
Gamma (γ)	${}^A_Z X^* \rightarrow \gamma + {}^A_Z X$	${}^{24}_{11} \text{Na}^* \rightarrow \gamma + {}^{24}_{11} \text{Na}$

Remarques :

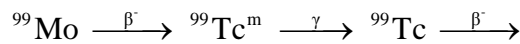
- Les émissions β^- , β^+ et la CE sont appelées des transformations isobariques car le radionucléide ${}^A_Z X$ émetteur, et le noyau résiduel ${}^A Y$ sont des isobares.

- L'émission gamma suit généralement les émissions α , β^- , β^+ et la CE qui laisse le noyau résiduel avec un excès d'énergie émis sous forme de rayonnement gamma.
- Le rayonnement γ est donc une émission d'énergie à partir du noyau excité ${}^A_ZX^*$ ayant un excès d'énergie : ${}^A_ZX^*$ et A_ZX différent seulement par leur état d'énergie

On appelle noyaux isomères des noyaux identiques qui se trouvent dans des états d'énergies différents.

- o Si l'émission γ par ${}^A_ZX^*$ est instantanée, ${}^A_ZX^*$ est dit noyau dans un état excité
- o Si l'émission γ est retardée ${}^A_ZX^*$ est dit noyau dans un état métastable (noté ${}^A_ZX^m$)

Exemple :



${}^{99}\text{Tc}^m$: Technétium 99 métastable

8. FORCES MISES EN JEU DANS UN ATOME

Les masses et les charges électriques des constituants atomiques font intervenir respectivement la force gravitationnelle et la force électrostatique suivantes :

$$|\vec{F}_G| = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r_{12}^2} : \text{Force gravitationnelle attractive entre les masses } m_1 \text{ et } m_2 \text{ distantes de } r_{12},$$

avec $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ SI}$: constante de la gravitation.

$$|\vec{F}_e| = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{12}^2} : \text{Force électrostatique (ou force de Coulomb) entre les charges ponctuelles}$$

q_1 et q_2 distantes de r_{12} ; avec $K = 9 \cdot 10^9 \text{ SI}$.

Si q_1 et q_2 sont de signes opposés, la force $|\vec{F}_e|$ négative est dite attractive : q_1 et q_2 s'attirent.

Si q_1 et q_2 sont de même signe, la force $|\vec{F}_e|$ positive est dite répulsive : q_1 et q_2 se repoussent (tableau 5).

Tableau 5. : Signes des forces électrostatiques dans l'atome.

Force coulombienne				
Noyau atomique			Cortège électronique	Cortège – Noyau
$(\vec{F}_e)_{p-p}$	$(\vec{F}_e)_{p-n}$	$(\vec{F}_e)_{n-n}$	$(\vec{F}_e)_{e^- - e^-}$	$(\vec{F}_e)_{\text{électron-proton}}$
Positive répulsive	Nulle neutre	Nulle neutre	Positive répulsive	Négative attractive

8.1. Définition de la force nucléaire

La force coulombienne répulsive entre les protons qui occupent un petit volume au centre de l'atome ne permet pas d'expliquer à elle seule la grande cohésion entre ces nucléons qui ont des charges de même signe. L'existence physique du noyau atomique, malgré la répulsion

entre les protons, est donc due à l'action d'une autre force suffisamment attractive pour compenser cette répulsion.

On montre que cette force très attractive appelée force nucléaire (\overline{F}_N) présente les caractéristiques suivantes :

- Elle est à courte portée : son action se manifeste uniquement au sein du noyau à des distances entre nucléons de l'ordre de 10^{-15} m.
- Elle est indépendante des charges électriques : elle est donc identique pour tous les nucléons :

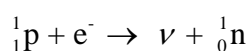
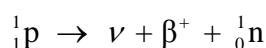
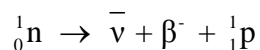
$$\left(\overline{F}_N\right)_{p-p} = \left(\overline{F}_N\right)_{n-n} = \left(\overline{F}_N\right)_{p-n}$$

Contrairement aux forces gravitationnelle et électrostatique dont les expressions mathématiques sont simples et bien connues, l'expression de la force nucléaire reste encore à déterminer. La formulation de son expression mathématique reste l'objectif de plusieurs chercheurs à travers le monde.

D'autre part, le tableau 1 montre l'existence d'une force répulsive entre les électrons du cortège. Le maintien de ces électrons dans le même espace extranucléaire malgré cette force répulsive prouve que la force attractive électrons-noyau compense la répulsion entre ces électrons.

Ainsi, les forces gravitationnelle, électrostatique et nucléaire coexistent dans un atome, que cet atome soit stable ou radioactif.

Cependant, on montre que dans les noyaux instables par radioactivité β^- , β^+ et C.E. existe, en plus de ces trois forces, une quatrième force appelée force d'interaction faible. Cette force faible de très courte portée agit par contact des nucléons, des neutrinos et des β au sein du noyau à l'instant des désintégrations suivantes :



8.2 Evaluation des forces gravitationnelle et coulombienne p-p pour $r_{pp} \approx 10^{-15}$ m.

$$\left|\overline{F}_G\right|_{pp} = 6,7 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(1,67 \cdot 10^{-27})^2}{(10^{-15})^2} \approx 1,87 \cdot 10^{-34} \text{ N} \quad \text{attractive mais très faible}$$

$$\left|\overline{F}_e\right|_{pp} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-15})^2} \approx 230 \text{ N} \quad \text{répulsive et très élevée ; cette force coulombienne}$$

est compensée, dans le noyau atomique, par la force nucléaire très attractive.

II. IDENTIFICATION DE L'ENERGIE

1. DEFINITION DE L'ENERGIE

L'énergie d'un corps est la faculté de ce corps de produire un travail. En sciences physiques le travail (W) d'une force \vec{F} se manifeste par le déplacement, la rotation ou la déformation d'un corps sous l'action de cette force.

Expression du travail d'une force, \vec{F} :

Soit AB le déplacement d'un corps sous l'action d'une force \vec{F} . Le travail de \vec{F} est le produit scalaire de \vec{F} et de \overline{AB} (figure 6.).

$$W = \vec{F} \cdot \overline{AB} = F \cdot AB \cdot \cos\theta \quad [3]$$

θ : angle entre \vec{F} et \overline{AB}

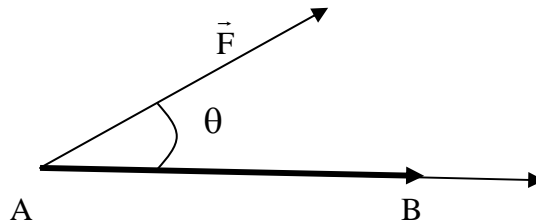


Figure 6

Unités (SI) :

F newton (N) ; AB mètre (m) ; W joule (J)

On appelle puissance P de la force le travail produit en une seconde.

Si W est produit en un temps t :
$$P = \frac{W}{t}$$

La puissance est aussi la quantité d'énergie fournie ou absorbée en une seconde.

Unités (SI) :

P en watt (W); $1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$

2. LES FORMES D'ENERGIE D'UN CORPS

2.1 Les formes d'énergie mises en jeu dans les phénomènes macroscopiques

Ces phénomènes tels le mouvement de translation, de rotation, de la chute libre, de l'élévation de température d'un corps etc. sont facilement observables et décelables ; ces phénomènes physiques font intervenir les formes d'énergie consignées dans le tableau 6.

Tableau 6

Formes d'énergie d'un corps	Energie potentielle de pesanteur	Energie cinétique	Energie calorifique	Energie potentielle électrostatique	Energie potentielle élastique d'un ressort
Paramètres physiques mis en jeu	Masse m Altitude z Accélération de pesanteur g	Masse m Vitesse v	Masse m Température t Chaleur massique c	Charge électrique q Potentiel électrostatique V	Raideur k Allongement x
Expressions mathématiques	$E_p = mgz$	$E_c = \frac{1}{2} mv^2$	$Q = mct$	$E_e = qV$	$E = \frac{1}{2} kx^2$

2.1.1. Condition pour qu'un corps produise un travail

Un corps produit du travail si son énergie varie. En d'autres termes, si l'énergie du corps reste constante, ce corps possède de l'énergie mais ne produit pas de travail.

Exemple : Travail fourni par la chute libre d'une masse d'eau d'un barrage :

Pour une chute d'eau (de masse m) entre deux altitudes z_i (hauteur initiale) et z_f (hauteur où l'eau entre en contact avec les palettes d'une roue, (figure 7) le travail produit par la force de pesanteur agissant sur m est égal à la variation de l'énergie potentielle de pesanteur de la masse d'eau :

$$W = mg(z_i - z_f) \quad [4]$$

$z_i - z_f$: déplacement de m sous l'action de la force de pesanteur $|\vec{F}| = |\vec{P}| = mg$

W est un travail de rotation puisque la roue tourne sous le poids ($\vec{P} = m\vec{g}$) de l'eau.

La relation 4 montre que l'énergie potentielle de pesanteur de la masse d'eau diminue pour se transformer en travail de rotation.

Si la masse d'eau reste immobile au niveau z_i , son énergie potentielle de pesanteur $E_{pi} = mgz_i$ reste constante et l'eau ne produit pas de travail.

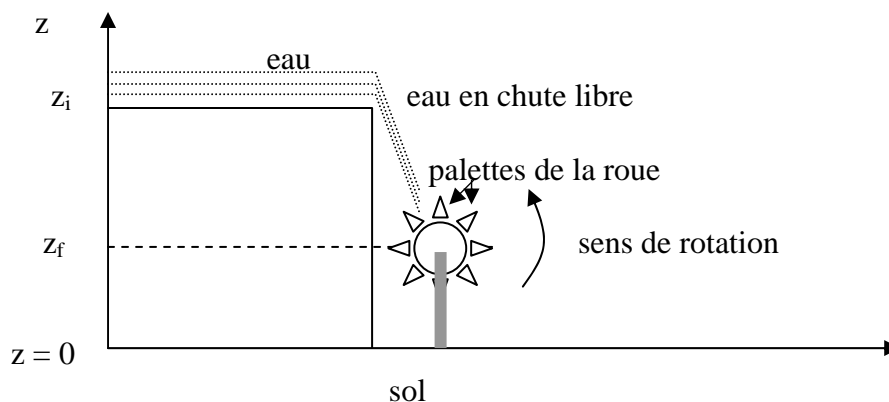


Figure 7

Remarque :

Les énergies potentielles sont évaluées par rapport à une position de référence qui est généralement la surface de la Terre (hauteur de référence $z = 0$) ou bien par rapport à une position origine conventionnelle quelconque.

2.1.2. Les lois de conservation de la matière et de l'énergie en physique macroscopique

L'expérience montre que l'interaction entre des corps macroscopiques s'effectue avec conservation de la matière et de toutes les formes d'énergie.

Loi de conservation de la matière :
$$\left[\sum m \right]_i = \left[\sum m \right]_f \quad [5]$$

Loi de conservation de l'énergie :
$$\left[\sum E \right]_i = \left[\sum E \right]_f \quad [6]$$

E : forme d'énergie quelconque d'un corps.

La loi (6) de conservation de l'énergie montre que toutes les formes d'énergie sont équivalentes.

Exemple : Chute libre d'une pierre de masse m entre les hauteurs z_i , z et $z_f = 0$ (Figure 8).

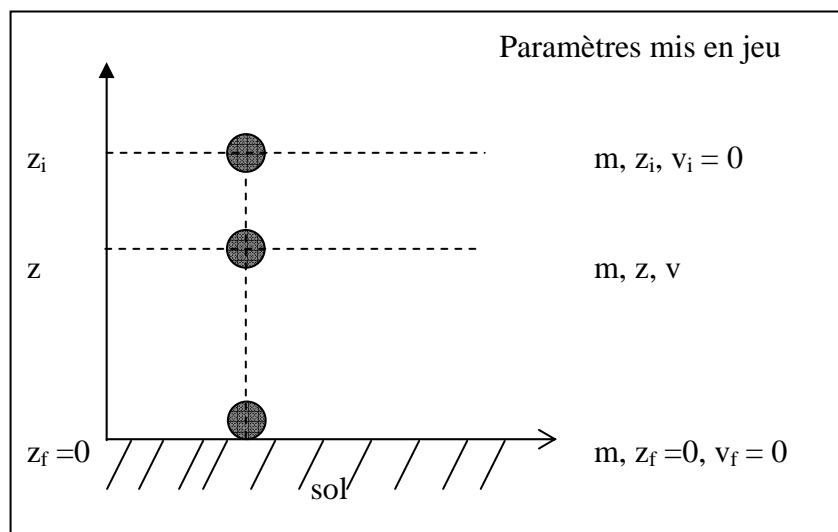


Figure 8.

La chute étant libre, la vitesse initiale du corps est donc nulle ($v_i = 0$).

La loi de conservation de l'énergie permet d'écrire entre z_i , z et $z_f = 0$.

$$mgz_i = mgz + \frac{1}{2}mv^2 = Q + W_{\text{déformation}} + \dots \quad [7]$$

Q : énergie calorifique dégagée par frottement de la pierre et du sol au niveau $z_f = 0$.

$W_{\text{déformation}}$: travail de déformation du sol sous l'impact de la pierre.

D'après [7], la relation $mg(z_i - z) = \frac{1}{2}mv^2$ montre que l'énergie potentielle de pesanteur est transformée en énergie cinétique : il y a donc équivalence entre ces deux formes d'énergie.

D'autre part, $mgz_i = Q + W_{\text{déformation}}$ montre que l'énergie potentielle de pesanteur initiale est transformée, à la fin de la chute en énergie calorifique et en travail de déformation conformément à la loi de conservation de l'énergie.

2.2 Les formes d'énergies mises en jeu dans les phénomènes subatomiques

L'interaction des corpuscules subatomiques fait intervenir, en plus des formes d'énergie du tableau 3, deux autres formes d'énergie appelées respectivement énergie de matière et énergie électromagnétique, définies dans les paragraphes 2.2.1. et 2.2.2.

2.2.1. Energie de matière : Principe d'équivalence masse énergie d'Einstein :

$$\underline{E=mc^2}$$

L'expérience montre que l'interaction entre des corpuscules subatomiques peut engendrer trois catégories de phénomènes physiques à savoir :

-(1) Les phénomènes qui s'effectuent avec conservation de la matière entre les états [i] et [f]

$$[\sum m]_i = [\sum m]_f \Rightarrow \delta m = [\sum m]_i - [\sum m]_f = 0$$

(voir diffusion élastique et diffusion inélastique en physique subatomique).

-(2) Les phénomènes qui s'effectuent avec une **disparition** d'une quantité de matière δm_d dans l'état final [f].

$$[\sum m]_f < [\sum m]_i \Rightarrow \delta m_d = [\sum m]_i - [\sum m]_f > 0$$

(voir : défaut de masse nucléaire, condition pour qu'un noyau soit radioactif, réactions nucléaires exoénergétiques : fission et fusion nucléaires, annihilation du positon e^+)

-(3) Les phénomènes qui ont lieu avec **apparition** d'une quantité de matière δm_a dans l'état final [f]

$$[\sum m]_f > [\sum m]_i \Rightarrow \delta m_a = [\sum m]_f - [\sum m]_i < 0$$

(voir réactions nucléaires endoénergétiques et création de la paire positon e^+ et négaton e^-)

Pour expliquer la non conservation de la matière c'est-à-dire la disparition ou bien l'apparition de la matière lors des interactions entre les corpuscules subatomiques, Einstein montre que la matière doit être considérée comme une autre forme d'énergie équivalente à toutes les autres formes d'énergies.

Le principe $E=mc^2$ signifie que la quantité de matière m est équivalente à l'énergie $E=mc^2$ à condition d'exprimer m en Kg, de prendre $c=310^8$ m/s et E en joule.

La validité de la formule $E=mc^2$, admise sans démonstration, est justifiée par le fait qu'elle permet d'interpréter des phénomènes physiques subatomiques inexplicables par les lois de la physique classique. En effet le principe $E=mc^2$ montre que si la quantité de matière δm

disparaît dans l'état final c'est par ce qu'elle se transforme en énergie $E_a = \delta m_a c^2$; E_a peut être par exemple de l'énergie cinétique $E_a = E_{ci}$ ou bien de l'énergie électromagnétique $E_a = h\nu$.

D'autre part, si la quantité de matière δm_a apparaît dans [f], elle est nécessairement créée à partir d'une autre forme d'énergie E_i issue de l'état initial [i] et telle que : $\delta m_a = \frac{E_i}{c^2}$

La forme d'énergie E_i transformée en quantité de matière δm_a peut être de l'énergie cinétique véhiculée par un corpuscule dans l'état initial ou bien celle d'un photon ($E_i = E_{ci}$; $E_i = h\nu$)

Remarque :

Alors que dans l'univers macroscopique, la matière et l'énergie sont deux composantes bien distinctes, dans l'univers subatomique elles se confondent en une seule composante : l'énergie.

CONSEQUENCES DU PRINCIPE D'EINSTEIN : $E = m \cdot c^2$

(1) Energies associées à un corpuscule subatomique

La matière étant de l'énergie, la masse propre m_0 d'un corpuscule, appelée masse au repos, est donc équivalente à une quantité d'énergie $m_0 c^2$. Les énergies associées à une particule subatomique que nous allons considérer dans la suite de ce cours sont donc les suivantes :

- Energie au repos d'un corpuscule de masse au repos m_0 : $E_0 = m_0 \cdot c^2$
- Energie cinétique classique d'un corpuscule de vitesse $v \ll c$: $E_{ci} = \frac{1}{2} m_0 v^2$
- Energie totale d'un corpuscule de vitesse $v \ll c$: $E = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2$
- Energie totale, d'un corpuscule relativiste dont la vitesse v est comparable à la vitesse de la lumière c : $\left(\frac{c}{10} \leq v < c\right)$: $E_t = m \cdot c^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot c^2$ [8]

$$m = m_0 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} : \text{masse relativiste du corpuscule dont la vitesse } v \text{ est}$$

comparable à la vitesse c de la lumière dans le vide.

- Energie cinétique relativiste d'un corpuscule : l'énergie totale du corpuscule étant la somme de son énergie au repos et de son énergie cinétique, il vient :

$$E_t = m_0 c^2 + E_{ci} \quad \Rightarrow \quad E_{ci} = m c^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \quad [9]$$

E_{ci} donnée par l'expression [9] est appelée énergie cinétique relativiste du corpuscule dont la vitesse v est comparable à $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Remarque :

Si $v \ll c \Rightarrow \frac{v}{c} \ll 1$ le développement limité $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{v^2}{2c^2}$ permet d'écrire :

$$E_{ci} \approx m_0 c^2 \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} - 1\right) = \frac{1}{2} m_0 v^2$$

Donc si $v \ll c$, l' E_{ci} relativiste se réduit à l' E_{ci} classique : $\frac{1}{2} m_0 v^2$

2 Expression de la loi de conservation de l'énergie en physique subatomique

L'évolution d'un système d'entité subatomique entre un état initial et un état final s'effectue avec la conservation de l'énergie totale du système. Cette énergie totale étant la somme de toutes les formes d'énergies cette loi s'écrit :

En considérant uniquement les énergies de matière et cinétique de corpuscules en interaction, la loi de conservation de l'énergie s'écrit entre les états [i] et [f] :

$$\left[\sum (m_0 c^2 + E) \right]_i = \left[\sum (m_0 c^2 + E) \right]_f \quad [10]$$

$m_0 c^2$: énergie au repos du corpuscule

E : forme d'énergie quelconque : E peut être de l'énergie : cinétique électromagnétique potentielle électrostatique etc.

3 Interprétation du défaut de masse du noyau atomique

L'expérience montre que la masse M' d'un noyau est plus petite que la somme des masses de ses proton et neutrons quand il sont isolés.

$$M' < Zm_p + Nm_n \Rightarrow \Delta m' = Zm_p + Nm_n - M' \quad [11]$$

La formation d'un noyau atomique à partir de ses constituants, initialement libres et isolés (figure 9), s'effectue donc avec une diminution d'une quantité de matière $\Delta m'$ appelée défaut de masse du noyau

Le principe $E = m \cdot c^2$ permet d'expliquer que la quantité de matière $\Delta m'$ qui disparaît dans l'état final [f] lors de la formation du noyau atomique se transforme en énergie totale de liaison des nucléons notée B et telle que : $B = \Delta m' \cdot c^2$

La masse du noyau atomique s'écrit alors :

$$M' = Zm_p + Nm_n - \Delta m' = Zm_p + Nm_n - \frac{B}{c^2}$$

Pour dissocier un noyau en ses nucléons il faut lui fournir une énergie $E=B$ de manière que la quantité de matière perdue $\Delta m'$ à l'instant de la formation de ce noyau soit récupérée et que chaque nucléon retrouve sa masse au repos quand il est libre. L'énergie E doit donc avoir une valeur telle que $\Delta m' = E/c^2$.

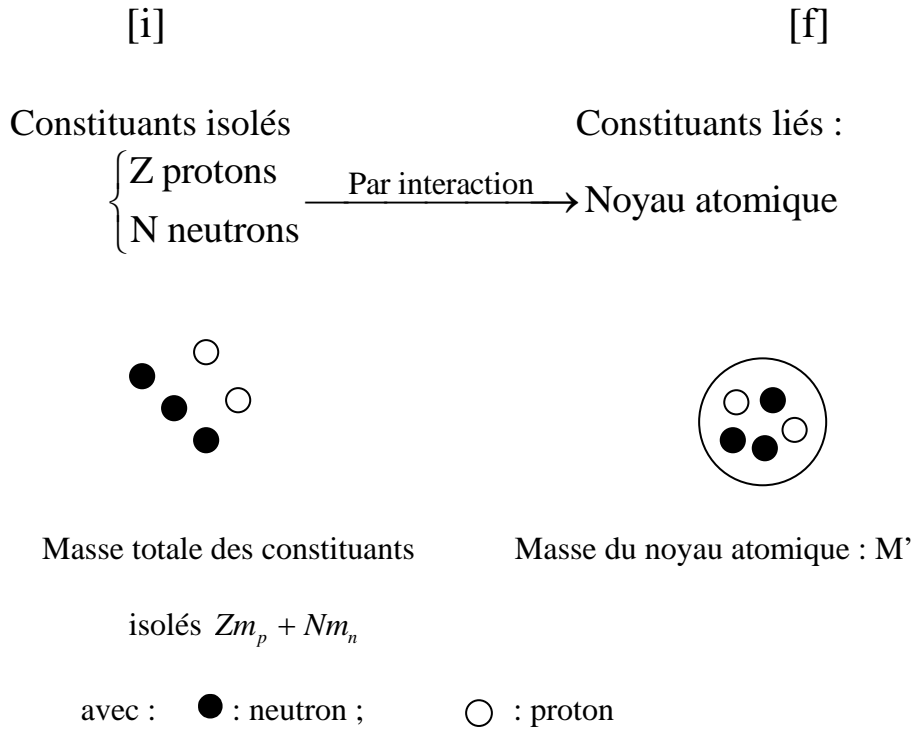


Figure 9.

Energie de liaison par nucléon

Pour comparer les énergies de liaison de divers noyaux, on utilise comme paramètre pratique de comparaison l'énergie de liaison par nucléon : $b = \frac{B}{A}$ soit $b = \frac{\Delta m' \cdot c^2}{A}$

B : énergie totale de liaison des nucléons

A : nombre total de nucléons du noyau (A = nombre de masse).

Valeurs des énergies de liaison par nucléon

Noyaux légers	Noyaux intermédiaires	Noyaux lourds
$2 < A < 20$	$20 < A < 190$	$A > 190$
$2,2 < b < 8 \text{ MeV}$	$\sim 8,7 \text{ MeV}$	$\sim 7,4 \text{ MeV}$

Evaluation de la masse M d'un atome :

La formation d'un atome à partir du noyau (masse M') et de Z électrons (masse : Zm_e) initialement isolés, s'effectue également avec une diminution d'une quantité de matière Δm :

$$M < M' + Zm_e \quad \Rightarrow \quad \Delta m = M' + Zm_e - M$$

Δm est appelée défaut de masse atomique.

La masse de l'atome est donc :

$$M = Zm_p + Nm_n + Zm_e - \Delta m' - \Delta m \quad [12]$$

Valeur approchée de la masse d'un atome

Le défaut de masse atomique Δm est l'équivalent de l'énergie totale de liaison ($\Delta m \cdot c^2$), électrons-noyau atomique.

L'énergie moyenne de liaison par électron est donc : $E_1 = \frac{\Delta m \cdot c^2}{Z}$

Exemples :

Energie de liaison de l'électron de l'atome hydrogène : $E_1 = 13,6 \text{ eV}$

Energie moyenne de liaison d'un électron d'un atome lourd : $E_1 = 100 \text{ keV}$

La comparaison des valeurs de b et de E_1 montre que :

$$b \gg E_1 \Rightarrow \frac{\Delta m' \cdot c^2}{A} \gg \frac{\Delta m \cdot c^2}{Z} \Rightarrow \Delta m' \gg \Delta m$$

Le défaut de masse atomique Δm étant négligeable devant le défaut de masse nucléaire $\Delta m'$.

La valeur approchée de M est donc :

$$M \approx Zm_p + Nm_n + Zm_e - \Delta m' \Rightarrow M \approx M' + Zm_e \quad [13]$$

Remarque :

La masse d'un corpuscule lié est plus petite que sa masse lorsqu'il est libre. : $m_{\text{lié}} < m_{\text{libre}}$

Le défaut de masse du corpuscule $\Delta m_{\text{corp}} = m_{\text{libre}} - m_{\text{lié}}$ est l'équivalent de son énergie de liaison :

$$E_{1\text{corp}} = \Delta m_{\text{corp}} c^2$$

Ainsi la masse d'un électron lié est :

$$m_{e_{\text{lié}}} = m_{e_{\text{libre}}} - \frac{E_1}{c^2} \quad [14]$$

Avec $m_{e_{\text{libre}}} = m_e$: masse au repos de l'électron

4 Condition pour qu'un noyau soit radioactif

Soit la désintégration nucléaire :
$${}^A_Z X \rightarrow R + Y$$

${}^A_Z X$: radionucléide de masse M'_X , ${}^A_Z X$ se désintègre au repos (énergie cinétique $E_X = 0$)

R : rayonnement émis (masse au repos m_R , énergie cinétique E_R).

Y : noyau résiduel (masse M'_Y et d'énergie cinétique E_Y).

La désintégration du noyau ${}^A_Z X$ est possible si elle vérifie la loi de conservation de l'énergie:

$$\sum (m_0 c^2 + E_{ci})_i = \sum (m_0 c^2 + E_{ci})_f$$

Appliquée à la désintégration ${}^A_Z X \rightarrow R + Y$ cette loi s'écrit :

$$M'_X c^2 = m_R c^2 + M'_Y c^2 + E_R + E_Y \Rightarrow (M'_X - M'_Y - m_R) c^2 = E_R + E_Y$$

L'énergie cinétique étant positive ($E_R + E_Y > 0$), on a donc :

$$(M'_X - M'_Y + m_R) > 0 \Rightarrow \boxed{M'_X > M'_Y + m_R} \quad [15]$$

La relation [15] est la condition sur la masse nucléaire M'_X pour que le noyau ${}^A_Z X$ soit radioactif par émission du rayonnement R de nature déterminée.

Condition sur la masse atomique M_X

Les valeurs expérimentales des masses atomiques étant plus précises que celles des masses nucléaires on exprime alors la condition [15] à l'aide des masses atomiques.

D'après [13] :

$$M'_X = M_X - Z_X m_e$$

$$M'_Y = M_Y - Z_Y m_e$$

La condition sur la masse atomique M_X pour que ${}^A_Z X$ se désintègre par émission d'un rayonnement R est donc:

$$\boxed{M_X > M_Y + (Z_X - Z_Y) m_e + m_R} \quad [16]$$

Si R est une particule : m_R est sa masse au repos

Si R est un noyau atomique : $m_R = M'_R = M_R - Z_R m_e$

Exercice :

Montrer que le radionucléide ${}^{238}_{92}\text{U}$ se désintègre par émission d'un noyau ${}^4_2\text{He}$

Données :

masses en unités d'énergie (en MeV) :

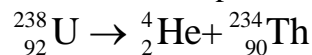
$${}^{238}_{92}\text{U} : M_{238} c^2 = (47,330 + 238 \times 931,5) \text{ MeV}$$

$${}^4_2\text{He} : M_4 c^2 = (2,592 + 4 \times 931,5) \text{ MeV}$$

$${}^{234}_{90}\text{Th} : M_{234} c^2 = (40,640 + 234 \times 931,5) \text{ MeV}$$

Solution :

Les lois de conservation de la charge électrique et du nombre de nucléons permettent d'écrire la désintégration nucléaire de ${}^{238}_{92}\text{U}$ suivante :



${}^{238}_{92}\text{U}$ se désintègre par émission d'un ${}^4_2\text{He}$ si la masse atomique M_{238} vérifie la condition [16] :

$$M_{238} > M_{234} + (92-90)m_e + (M_4 - 2m_e)$$

$$M_{238} > M_{234} + M_4$$

Et en unité d'énergie (MeV) $M_{238} \cdot c^2 > M_{234} \cdot c^2 + M_4 \cdot c^2$

$$[47,330 > 40,640 + 2,592 = 43,232] \text{ MeV}$$

La condition [16] étant vérifiée, ${}^{238}_{92}\text{U}$ se désintègre donc par émission d' ${}^4_2\text{He}$.

Conditions d'instabilités α , β^- , β^+ , CE et γ

La relation [16] appliquée à la désintégration d'un radionucléide au repos, permet de déterminer la condition pour que A_ZX se désintègre par un rayonnement de nature donnée (tableau 7).

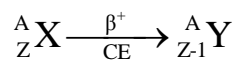
Tableau 7 : Condition d'instabilité α , β^- , β^+ , CE et γ

Ecriture de l'instabilité nucléaire	Z_X	Z_Y	m_R	Condition : $M_X > M_Y + (Z_X - Z_Y)m_e + m_R$
${}^A_ZX \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}Y$	Z	Z-2	$M_{4\text{He}} - 2m_{e^-}$	$M_X > M_Y + M_{4\text{He}}$
${}^A_ZX \rightarrow \beta^- + \bar{\nu} + {}^A_{Z+1}Y$	Z	Z+1	$m_{\beta^-} = m_{e^-}$ $m_{\bar{\nu}} \approx 0$	$M_X > M_Y$
${}^A_ZX \rightarrow \beta^+ + \nu + {}^A_{Z-1}Y$	Z	Z-1	$m_{\beta^+} = m_{e^-}$ $m_{\nu} \approx 0$	$M_X > M_Y + 2m_{e^-}$
${}^A_ZX + e^- \rightarrow \nu + {}^A_{Z-1}Y$	Z	Z-1	$m_{\nu} \approx 0$	$M_X + \left(m_e - \frac{E_1}{c^2}\right) > M_Y + (Z - Z+1)m_e$ $M_X > M_Y + \frac{E_1}{c^2}$
${}^A_ZX^* \rightarrow \gamma + {}^A_ZX$	Z	Z	$m_{\gamma} = 0$	$M_{X^*} > M_X$

Remarque :

Les instabilités β^+ et la CE conduisent au même noyau résiduel ${}^A_{Z-1}Y$ et se trouvent en compétition si la condition (en unité d'énergie) $M_X \cdot c^2 > M_Y \cdot c^2 + 2m_{e^-} \cdot c^2$ est vérifiée. En effet cette condition entraîne la condition $M_X c^2 > M_Y c^2 + E_1$ car $2m_{e^-} \cdot c^2 = 1,022 \text{ MeV}$ est très supérieure à l'énergie de liaison de l'électron capturé $E_1 \approx 100 \text{ keV}$. Dans ce cas une espèce nucléaire formée de radionucléides A_ZX se désintègre à la fois par β^+ et par CE.

Par contre si seule la condition $M_X c^2 > M_Y c^2 + E_1$ est remplie il y a uniquement la CE et pas d'émission β^+ car E_1 étant inférieure à $2m_{e^-} \cdot c^2 = 1,022 \text{ MeV}$ la condition pour avoir l'émission β^+ n'est pas remplie.



5 Chaleur d'une réaction nucléaire et énergie nucléaire

a. Définition d'une réaction nucléaire (RN)

Une RN est une interaction entre un projectile subatomique \underline{a} et un noyau cible ${}^A_Z X$ engendrant l'émission d'un rayonnement b et la formation d'un noyau résiduel Y .

Ecriture d'une RN :



Une RN s'écrit plus simplement ${}^{A_X} X(a,b) {}^{A_Y} Y$ ou $X(a,b)Y$.

Dans une RN le noyau cible ${}^{A_X} X$ étant considéré au repos, son énergie cinétique est donc nulle : $E_X = 0$

E_a , E_b , et E_Y sont les énergies cinétiques respectivement de a , b et Y .

L'identification de X , a , b et Y de la RN (17) nécessite l'application des lois de conservation de la charge électrique et du nombre de nucléons à savoir :

$$Z_X e + Z_a e = Z_b e + Z_Y e \quad (18)$$

$$A_X + A_a = A_b + A_Y \quad (19)$$

Exemples : Identification des noyaux Y dans les réactions nucléaires suivantes :

Réaction Nucléaire	Lois de conservation	RN identifiée
${}^{14}_7 N + {}^1_0 n \rightarrow {}^1_1 p + Y$	$\begin{cases} 7e + 0e = 1e + Z_Y e \Rightarrow Z_Y = 6 \\ 14 + 1 = 1 + A_Y \Rightarrow A_Y = 14 \end{cases} \Rightarrow Y = {}^{14}_6 C$	${}^{14} N(n,p) {}^{14} C$
${}^{14}_7 N + {}^1_0 n \rightarrow {}^3_1 H + Y$	$\begin{cases} 7e + 0e = 1e + Z_Y e \Rightarrow Z_Y = 6 \\ 14 + 1 = 3 + A_Y \Rightarrow A_Y = 12 \end{cases} \Rightarrow Y = {}^{12}_6 C$	${}^{14} N(n, {}^3 H) {}^{12} C$
${}^{16}_8 O + {}^1_1 p \rightarrow \gamma + Y$	$\begin{cases} 8e + 1e = 0e + Z_Y e \Rightarrow Z_Y = 9 \\ 16 + 1 = 0 + A_Y \Rightarrow A_Y = 17 \end{cases} \Rightarrow Y = {}^{17}_9 F$	${}^{16} O(p,\gamma) {}^{17} F$

La détermination des énergies mises en jeu dans une RN nécessite l'application des lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement à savoir :

$$\begin{aligned} (M_X + M_a)c^2 + E_a &= (M_b + M_Y)c^2 + E_b + E_Y \\ M_a \vec{v}_a &= M_b \vec{v}_b + M_Y \vec{v}_Y \end{aligned} \quad (20)$$

b. Définition de la chaleur d'une réaction nucléaire

La chaleur d'une réaction nucléaire est la différence des masses des corpuscules entre l'état initial et l'état final

Notée Q et exprimée en unité d'énergie, la chaleur d'une réaction nucléaire a pour expression :

$$Q = (M_X + M_a)c^2 - (M_b + M_Y)c^2 \quad (21)$$

L'expérience montre que la chaleur d'une réaction nucléaire peut être **positive**, **négative** ou **nulle**.

i. Si $Q > 0$, la RN est dite exoénergétique

$Q > 0 \Rightarrow (M_X + M_a) > (M_b + M_Y) \Rightarrow$ la quantité de matière

$\delta m_{\text{exo}} = (M_X + M_a) - (M_b + M_Y)$ disparaît dans l'état final et se transforme, d'après la loi de conservation de l'énergie (20) en énergie cinétique de b et de Y.

$$Q = \delta m_{\text{exo}} c^2 = E_b + E_Y - E_a \quad (22)$$

Cette relation montre qu'une RN exoénergétique se produit même si l'énergie E_a du projectile est très faible car si $E_a \approx 0$, l'énergie cinétique $E_b + E_Y$ reste positive puisque $Q > 0$.

$$\delta m_{\text{exo}} c^2 = Q \approx E_b + E_Y > 0$$

c. Définition de l'énergie nucléaire

Dans une réaction nucléaire exoénergétique on appelle **énergie nucléaire** la quantité d'énergie $\delta m_{\text{exo}} c^2$ équivalente à la quantité de matière $\delta m_{\text{exo}} = (M_X + M_a) - (M_b + M_Y)$ et transformée en énergie cinétique $(E_b + E_Y - E_a)$ véhiculée par b et Y.

L'énergie nucléaire $\delta m_{\text{exo}} c^2$ représente donc la chaleur d'une RN exoénergétique.

D'autre part l'énergie cinétique $(E_b + E_Y - E_a)$ est transformée en énergie calorifique (ou énergie thermique) grâce aux chocs successifs du rayonnement b et de l'atome Y avec les atomes et les molécules du milieu traversé par ces corpuscules.

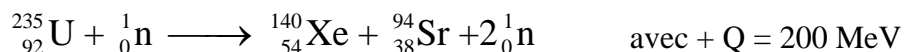
Cette énergie calorifique d'origine nucléaire est mise à profit dans les réacteurs nucléaires (ou centrales nucléaires) pour produire de l'électricité domestique et industrielle exploitée dans plusieurs pays à travers le monde.

Exemples de Réactions nucléaires exoénergétiques productrices d'énergie nucléaire

1- La fission nucléaire : c'est la fragmentation d'un noyau lourd ${}^A_Z X$ sous l'action d'un projectile a. Cette R.N. engendre deux noyaux plus légers Y_1 et Y_2 appelés fragments de fission, l'émission de deux ou trois neutrons et de la libération d'une énergie nucléaire $Q \approx 200 \text{ MeV}$.

Les fragments de fission Y_1 et Y_2 étant radioactifs et souvent inutilisables constituent les déchets radioactifs de la fission nucléaire.

Exemple : Fission de l'uranium 235 sous l'action des neutrons d'énergie $E_n = 0,025 \text{ eV}$



L'énergie $Q = 200 \text{ MeV}$ libérée à chaque fission de ${}^{235}\text{U}$ est exploitée dans la plupart des centrales nucléaires pour produire de l'électricité.

2- La fusion nucléaire : c'est l'union de deux noyaux légers qui engendre un noyau plus lourd et libère une quantité d'énergie Q.

Exemple

Fusion de l'hydrogène 2 et de l'hydrogène 3



La fusion produit très peu de déchets radioactifs car ${}^4_2\text{He}$ est très stable et les neutrons libres se désintègrent rapidement par β^- (${}^1_0\text{n} \rightarrow \beta^- + \bar{\nu} + {}^1_1\text{p}$).

COMPARAISON DES ENERGIES NUCLEAIRES DE FISSION ET DE FUSION

Nous allons comparer l'énergie nucléaire libérée par nucléon engagé dans l'état initial $\frac{Q}{\sum A_i}$

dans chaque réaction nucléaire

Cette comparaison peut être effectuée à l'aide des l'énergie nucléaire par nucléon engagée dans l'état initial de chaque réaction nucléaire :

$$\frac{Q}{\sum A_i} \rightarrow \begin{cases} \frac{Q_{\text{fission}}}{235+1} = \frac{200}{236} = 0,85 \text{ MeV/nucléon} \\ \frac{Q_{\text{fusion}}}{3+2} = \frac{17}{5} = 3,4 \text{ MeV/nucléon} \end{cases}$$

C'est donc la fusion nucléaire qui libère la plus d'énergie.

La fusion nucléaire est d'autant plus séduisante qu'elle reste peu polluante et que elle nécessite des noyaux ${}^2\text{H}$ et ${}^3\text{H}$ très abondants dans l'eau de mer et l'eau douce des pôles nord et sud de notre planète.

Mais contrairement à la fission qui fournit de l'énergie nucléaire d'une façon continue, la fusion n'est pas encore maîtrisée. La production d'énergie à partir de la fusion nucléaire est l'objectif du projet international ITER en cours de réalisation à Cadarache dans le sud de la France .L'énergie stratégique du futur reste donc celle qui sera fournie en continu par la fusion des noyaux légers.

i. Si $Q < 0$, la RN est dite endoénergétique

$Q < 0 \Rightarrow (M_x + M_a) < (M_b + M_Y)$: la quantité de matière $\delta m_{\text{endo}} = (M_b + M_Y) - (M_x + M_a)$ est créée dans l'état final à partir de l'énergie cinétique mise en jeu dans l'état initial et véhiculée par le projectile a.

D'après la loi de conservation de l'énergie (20) la relation $E_a = \delta m_{\text{endo}} c^2 + E_b + E_Y$ montre que E_a est transformée en partie en énergie de matière $\delta m_{\text{endo}} c^2$ et le reste en énergie cinétique ($E_b + E_Y$) de b et de Y.

Une RN endoénergétique a lieu seulement si $E_a > \delta m_{\text{endo}} c^2$: il faut donc que l'énergie cinétique E_a du projectile soit suffisante pour créer la quantité de matière δm_{endo} dans l'état final et communiquer à b et Y de l'énergie cinétique ($E_b + E_Y$).

On appelle **énergie seuil** (E_{as}) d'une réaction nucléaire endoénergétique l'énergie cinétique du projectile à partir de laquelle est déclenchée une réaction endoénergétique.

$$E_{as} = \delta m_{\text{endo}} c^2$$

Remarque :

- Une des fonctions des accélérateurs de particules chargées est de permettre de communiquer aux projectiles de faible énergie de l'énergie cinétique au dessus de l'énergie seuil afin de produire des réactions nucléaires endoénergétiques.

C'est grâce à ces accélérateurs qu'il est possible de produire des projectiles qui permettent d'explorer les noyaux atomiques pour en définir la structure et le mode d'interaction avec ces projectiles

- Les radio-isotopes artificiellement utilisés dans plusieurs domaines de la vie sont des noyaux résiduels γ radioactifs issus des réactions nucléaires exoénergétiques et endoénergétiques ou bien sont des produits de fissions nucléaires extraits des déchets radioactifs.

ii. Si $Q = 0$ la RN est soit une diffusion élastique soit une diffusion inélastique

1. une diffusion élastique s'écrit :



Dans une diffusion élastique il y a transfert d'énergie cinétique au noyau X initialement au repos ; X reste dans son état fondamental.

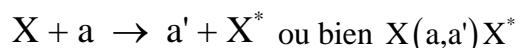
Dans une diffusion élastique l'équation de conservation de l'énergie s'écrit :

$$(M_X + M_a) c^2 + E_a = (M_a + M_X) c^2 + E_{a_1} + E_X$$

E_{a_1} : énergie cinétique résiduelle du projectile a après une diffusion élastique

L'énergie transférée par diffusion élastique au noyau X est donc : $E_X = E_a - E_{a_1}$

2. Une diffusion inélastique s'écrit :



Dans une diffusion inélastique, il y a transfert d'énergie cinétique E_X et d'énergie d'excitation E_X^* au noyau cible X initialement au repos.

E_{a_1} étant l'énergie cinétique résiduelle du projectile après une diffusion inélastique on a :

$$E_a = E_{a_1} + E_X + E_X^*$$

L'énergie cinétique transférée au noyau X après une diffusion inélastique est donc :

$$E_X = E_a - E_{a_1} - E_X^*$$

2.2.2. Energie électromagnétique mise en jeu dans les phénomènes subatomiques

Cette forme d'énergie est liée à la notion de champ électromagnétique et d'onde électromagnétique créés par des charges électriques en mouvement uniformément varié. Afin de comprendre l'origine et la nature de cette forme d'énergie il est nécessaire de rappeler dans quelles circonstances est généré un champ électromagnétique ainsi qu'une onde électromagnétique.

Une charge électrique, q , modifie son environnement dans les situations suivantes :

- 1- q immobile (état statique) crée un champ électrostatique \vec{E} ; l'existence de \vec{E} est mise en évidence lorsqu'il y a attraction ou répulsion entre q et une charge q' placée au voisinage de q .
- 2- q en mouvement uniforme (vitesse constante) crée un champ d'induction magnétique \vec{B} constant. L'existence de \vec{B} est mise évidence grâce à la déviation de l'aiguille aimantée d'une boussole initialement orientée dans le champ magnétique terrestre. Cette situation de la charge q est celle des électrons soumis à l'action d'un champ électromoteur constant fourni par un générateur de courant continu. L'aiguille aimantée placée au voisinage du circuit électrique dévie à la fermeture du circuit et montre ainsi l'existence d'un champ d'induction magnétique \vec{B} (figure 10)

La vitesse de déplacement des électrons étant constante sous l'action du champ électromoteur constant, le champ d'induction magnétique \vec{B} est donc également invariable

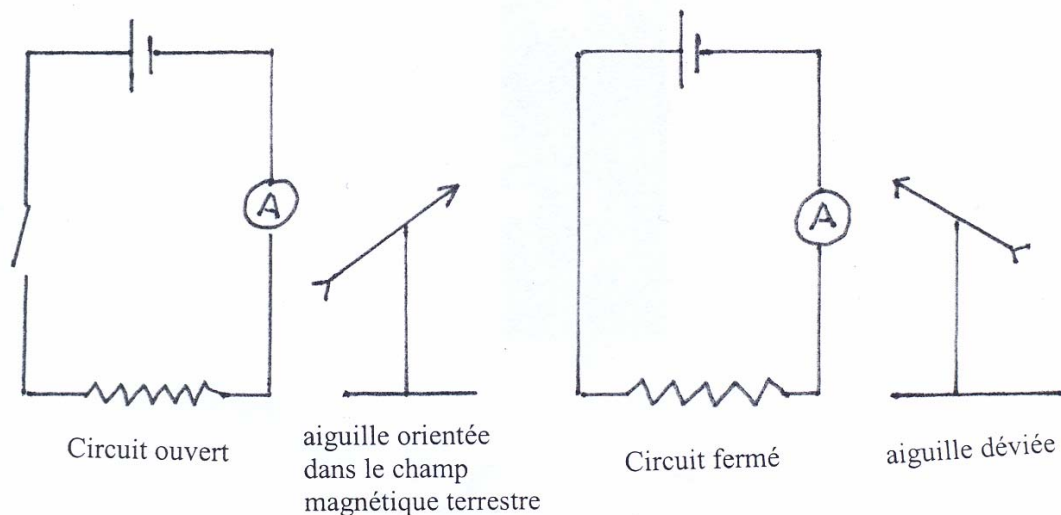


Figure 10

- 3- q en mouvement uniformément varié (vitesse variable) crée un champ d'induction magnétique \vec{B} variable. L'expérience montre que \vec{B} variable crée à son tour un champ électrique \vec{E} capable de déclencher le mouvement des électrons dans un circuit sans générateur : le déplacement de ces électrons en l'absence d'un champ électromoteur est appelé courant induit.

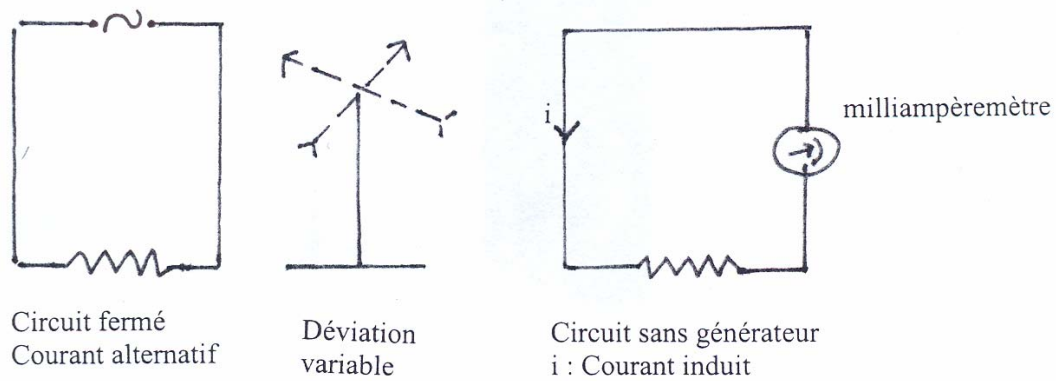


Figure 11

On appelle **champ électromagnétique** l'ensemble des deux champs \vec{E} et \vec{B} créés par une charge en mouvement uniformément varié. Cette situation de charges en mouvement uniformément varié est celle des électrons se déplaçant dans un circuit électrique sous l'action d'un champ électromoteur variable fourni par un générateur de courant alternatif. Ces électrons en mouvement sinusoïdal créent alors un champ électromagnétique (\vec{E}, \vec{B}) variable dépendant de la fréquence de ce mouvement.

Lorsque la fréquence du mouvement sinusoïdal de ces charges électriques est basse (cas du courant alternatif domestique $\nu = 50\text{Hz}$), le champ électromagnétique (\vec{E}, \vec{B}) s'annule au voisinage du circuit électrique.

Par contre, lorsque les charges électriques sont en mouvement sinusoïdal de haute fréquence, $\nu > 10^6 \text{ Hz}$ (mouvement appelé alors mouvement oscillatoire ou vibratoire), le champ électromagnétique (\vec{E}, \vec{B}) se propage dans l'espace à la vitesse $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ dans le vide.

L'expérience montre que les champs \vec{E} et \vec{B} présentent les mêmes caractéristiques que les charges en mouvement vibratoire (même fréquence, même période). D'autre part, \vec{E} et \vec{B} se propagent en phase en restant perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à leur direction de propagation (figure 12).

On appelle **onde électromagnétique** (OEM) le champ électromagnétique (\vec{E}, \vec{B}) qui se propage dans le vide à la vitesse $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$, à partir d'une source de particules chargées en mouvement vibratoire de haute fréquence.

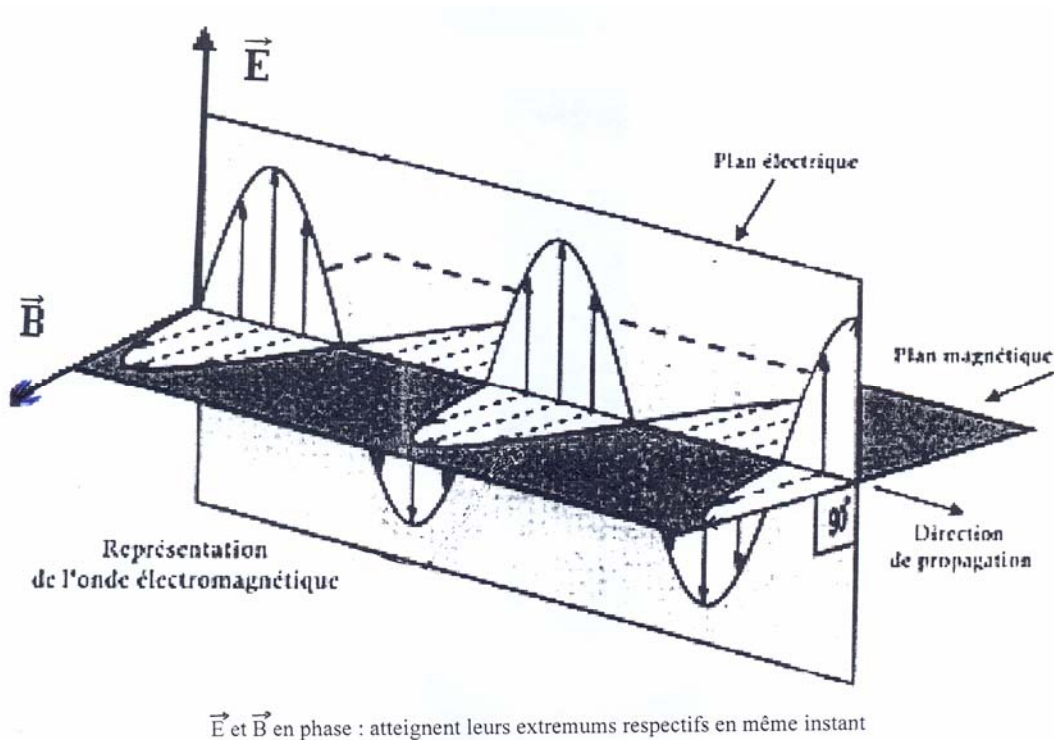


Figure 12

- **Caractéristiques d'une OEM :**

- La vitesse de propagation dans le vide (ou dans l'air) $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.
- La vitesse v de propagation dans un milieu transparent d'indice de réfraction n est telle que $v = \frac{c}{n}$ (car par définition $n = \frac{c}{v}$)

Sachant que le champ électromagnétique (\vec{E}, \vec{B}) présente le même mouvement vibratoire que la source de particules chargées, l'OEM a donc les mêmes caractéristiques que cette source à savoir : même période T et même fréquence ν .

- Rappelons que la période T est le temps au bout duquel l'OEM se retrouve dans le même état vibratoire donc avec les mêmes caractéristiques.
- La fréquence ν est le nombre de fois par seconde où l'OEM se trouve dans le même état vibratoire, la fréquence est donc le nombre de périodes par seconde $\nu = \frac{1}{T}$.
- On appelle longueur d'onde associée à une OEM la distance parcourue par l'onde en un temps égal à une période T (figure 13)

Dans le vide, la longueur d'onde notée λ est donc : $\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu}$ [23]

Avec c = distance parcourue en 1 seconde

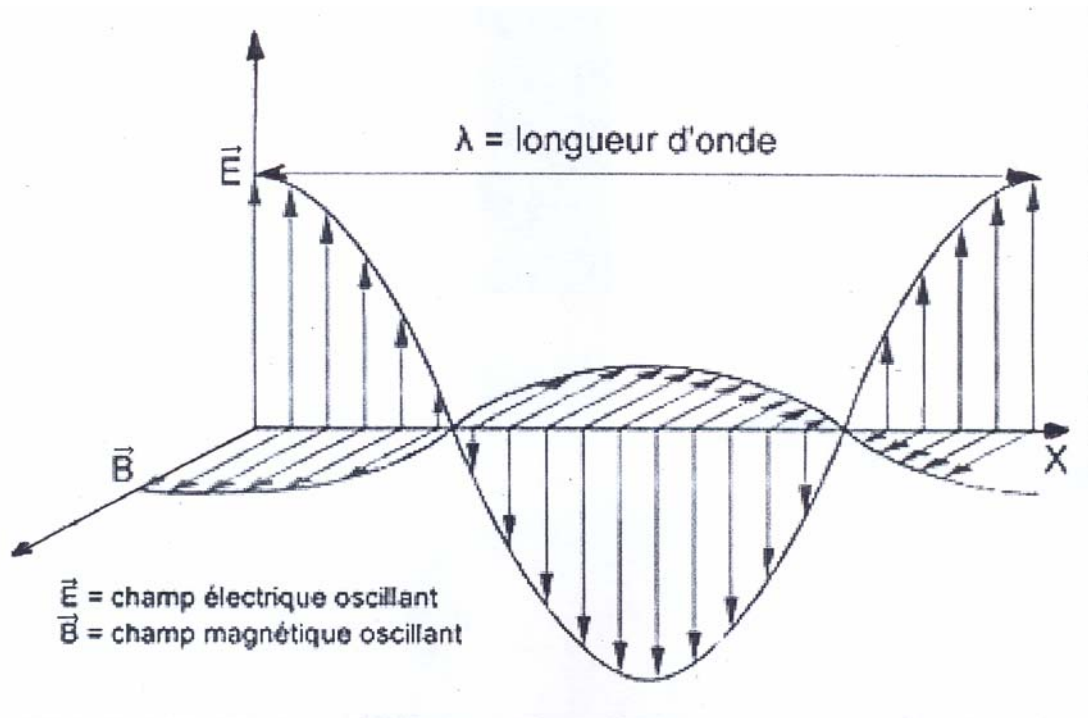


Figure 13

Dans un milieu transparent d'indice de réfraction n la longueur d'onde λ_i est la distance parcourue par l'OEM à la vitesse v et en un temps égal à une période.

$$\lambda_i = v \cdot T = \frac{c}{n} \cdot T \Rightarrow \lambda_i = \frac{\lambda}{n}$$

Unités :

T	v	λ	v et c
s	Hz	m	m.s ⁻¹

- Nomenclature des OEM

Les ondes électromagnétiques portent des noms particuliers selon les valeurs de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien selon la nature des sources de particules chargées en qui les génèrent.

Ces sources peuvent être :

- les électrons d'un circuit électrique oscillant, d'un cristal, d'une molécule ou bien du cortège atomique
- les protons d'un noyau atomique.

Alors que les circuits électriques oscillants génèrent des OEM de grandes longueurs d'onde, les constituants subatomiques de la matière peuvent, dans certaines conditions, émettre des ondes électromagnétiques de très petites longueurs d'onde (tableaux 8 et 9).

Tableau 8

Nature de la source	Nom des radiations émises	Gamme des longueurs d'onde
Circuit électrique oscillant	Ondes hertziennes -micro-ondes	Du km au μm
Molécules	Infrarouges	Du μm à 800 nm
Cortège électronique d'un atome	Lumière	(800 à 400) nm
	Ultra violet (U,V)	(400 à 10) nm
	Rayons (RX)	< 10 nm
Noyau atomique	Rayons gamma ($R\gamma$)	$\ll 10^{-11}$ m

Tableau 9

Type d'onde Electromagnétique	région du spectre	Fréquence Hz	Longueur d'onde	Unité
Radio	Radio	10^4 - 10^8	3×10^4 -3	Mètres
Télévision		10^8 - 10^9	3 - 0.3	Mètres
Radar		10^9 - 10^{10}	30-3	Centimètres
Micro-ondes		10^{10} - 10^{12}	3 - 0.03	Centimètres
Infrarouge		10^{13}	30	Micromètres
Lumière visible	Optique	4×10^{14} - 8×10^{14}	750 - 400	Nanomètres
Ultraviolet		10^{15}	300	Nanomètres
Rayons X	Rayon ou Particule	10^{18}	300	Picomètres
Rayons Gamma		10^{20}	3	Picomètres
Rayons cosmiques		10^{24}	0.3	femtomètres

Centimètre $\approx 10^{-2}$ m Millimètre $\approx 10^{-3}$ m Micromètre $\approx 10^{-6}$ m Nanomètre $\approx 10^{-9}$ m
Picomètre $\approx 10^{-12}$ m Femtomètre $\approx 10^{-15}$ m

Remarques :

- Les OEM de petites longueurs d'ondes sont appelées radiations ou rayonnements électromagnétiques.
- Une radiation monochromatique est une OEM caractérisée par une seule longueur d'onde.

- Le rayonnement visible (ou lumière) est un ensemble de radiations monochromatiques entre la lumière rouge ($\mu = 0,8 \mu\text{m} = 800 \text{ nm}$) et la lumière violette ($\mu = 0,4 \mu\text{m} = 400 \text{ nm}$).

- **Définition et expression de l'énergie électromagnétique véhiculée par des radiations de petites longueurs d'onde** (rayonnement : infra rouge, visible, ultra violet, rayon X et rayon gamma)

On appelle **énergie électromagnétique** l'énergie émise par des particules chargées en mouvement vibratoire et véhiculée dans l'espace par une onde électromagnétique à la vitesse c dans le vide.

L'expérience montre qu'une OEM de petite longueur d'onde interagit avec la matière en mettant en jeu une quantité d'énergie électromagnétique déterminée proportionnelle à sa fréquence ν . Cette énergie échangée avec la matière a pour expression : $E = h \cdot \nu$

h est la constante de Planck ; $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$h \cdot \nu$ est la plus petite quantité d'énergie électromagnétique véhiculée par une onde électromagnétique de fréquence ν . Le quantum d'énergie électromagnétique $h\nu$ est appelé **photon**.

Un rayonnement électromagnétique de petite longueur d'onde propage l'énergie par photons $h\nu$ à la vitesse $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ dans le vide.

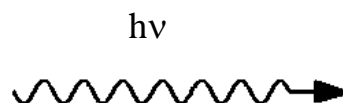
Expression du photon :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad [24]$$

Unités (SI) :

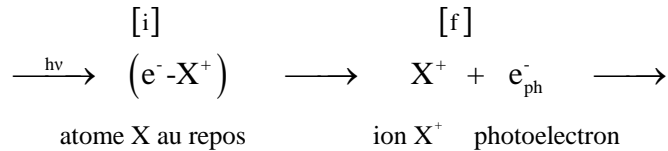
Grandeur	E	ν	λ	c
Unités	Joule	$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$	m	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Représentation d'un photon : à l'aide de petites sinusoïdes se terminant par une flèche :



Exemple d'un phénomène physique mettant en jeu le photon $h\nu$: l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique résulte de l'interaction d'un photon $h\nu$ et d'un électron atomique d'énergie de liaison E_l : L'électron absorbe $h\nu$ et se trouve éjecté hors de l'atome en emportant une énergie cinétique $E_{e_{\text{ph}}^-}$; cet électron éjecté hors de l'atome est appelé photoélectron noté e_{ph}^- .



Condition pour produire l'effet photoélectrique

La loi de conservation de l'énergie appliquée à l'effet photoélectrique s'écrit :

$$h\nu + \left(m_{e_{lié}} c^2 + M_{X^+} c^2 \right) = M_{X^+} c^2 + E_{X^+} + m_{e_{libre}} c^2 + E_{e_{ph}^-} \quad [25]$$

l'ion atomique X^+ étant lourd, son énergie cinétique E_{X^+} est négligeable devant celle du photoélectron : $E_{X^+} \ll E_{e_{ph}^-}$

d'autre part : $m_{e_{lié}} = m_{e_{libre}} - \frac{E_1}{c^2}$

avec $m_{e_{libre}} = m_e =$ masse au repos de l'électron libre

La relation [19] devient donc :

$$\begin{aligned}
 h\nu + m_e c^2 - E_1 &= m_e c^2 + E_{e_{ph}^-} \\
 h\nu &= E_1 + E_{e_{ph}^-} \quad [26]
 \end{aligned}$$

La condition pour ioniser un atome par effet photoélectrique est donc :

$$h\nu > E_1$$

L'énergie photonique $h\nu$ doit donc être supérieure à l'énergie de liaison E_1 de l'électron car elle doit être suffisante pour arracher l'électron lié avec une énergie E_1 et pour communiquer à cet électron une énergie cinétique $E_{e_{ph}^-}$.

On appelle énergie seuil de l'effet photoélectrique l'énergie $E_s = h\nu_s$ juste suffisante pour arracher un électron lié sans lui communiquer de l'énergie cinétique :

$$E_s = h\nu_s = E_1$$

Pour produire l'effet photoélectrique il faut $h\nu > h\nu_s \Rightarrow \lambda < \lambda_s$

Exercice :

- 1- Quelle doit être la longueur d'onde d'une radiation électromagnétique pour ioniser l'atome d'hydrogène ?
2. Calculer l'énergie cinétique du photoélectron lorsque $h\nu = 30 \text{ eV}$

Données :

Energie de liaison de l'électron de l'atome H : $E_l = 13,6 \text{ eV}$; $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Solution :

1- L' e^- de l'atome H est libéré si l'énergie photonique vérifie la condition $h\nu > h\nu_s$

$$\text{Comme } E_s = h\nu_s \quad E_1 \Rightarrow \frac{hc}{\lambda} > E_1 \Rightarrow \lambda < \frac{hc}{E_1}$$

$$\lambda < \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}$$

$$\lambda < 0,9126 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda < 91 \text{ nm}$$

Les radiations dont la longueur d'onde est inférieure à 91 nm peuvent donc ioniser l'atome d'hydrogène.

2- L'énergie cinétique $E_{e_{ph}}$ du photoélectron étant telle que $h\nu = E_1 + E_{e_{ph}}$ on a donc :

$$E_{e_{ph}} = h\nu - E_1$$

$$E_{e_{ph}} = 30 - 13,6 = 16,4 \text{ eV}$$

Remarque :

- Le photon incident $h\nu$ est totalement absorbé par effet photovoltaïque et n'existe plus dans l'état final.
- L'effet photoélectrique a lieu seulement si l'énergie photonique est apportée en une seule quantité $h\nu$ par une radiation de fréquence $\nu = \frac{E}{h} = \frac{30 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,62 \cdot 10^{-34}} = 7,256 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ correspondant à une seule longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{7,256 \cdot 10^{15}} = 41,4 \text{ nm}$.

Si les 30 eV sont apportés sous forme de trois photons $h\nu_1$, $h\nu_2$, $h\nu_3$, tels que $h\nu_1 + h\nu_2 + h\nu_3 = (12+13+5) = 30 \text{ eV}$, l'effet photoélectrique n'aura pas lieu car chacune de ces énergies photoniques est inférieure à l'énergie seuil $h\nu_s + E_1 = 13,6 \text{ eV}$.

III. DEFINITION DE LA DUALITE ONDE CORPUSCULE DES OEM ET DES PARTICULES SUBATOMIQUES

1. DUALITE ONDE CORPUSCULE DES OEM

Les OEM traversent la matière en engendrant des phénomènes physiques de deux natures différentes à savoir des phénomènes corpusculaires et des phénomènes ondulatoires :

- Les **phénomènes corpusculaires** sont issus de l'interaction entre le photon $h\nu$ et les constituants de la matière (molécule, atome, électron, noyau atomique, ...).

Exemple : l'effet photoélectrique est un phénomène corpusculaire.

Un phénomène corpusculaire est déclenché si l'énergie mise en jeu dans l'interaction de l'onde et de la matière est apportée par l'onde en une seule quantité $h\nu$. Le photon est alors assimilé à un corpuscule sans masse ($m_{h\nu} = 0$) et d'énergie $h\nu$. L'OEM est donc considérée comme une suite de corpuscules indépendants les uns des autres et agissant individuellement à l'instar d'une particule véhiculant chacun une énergie $h\nu$ à la vitesse c ($= 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$) dans le vide : on dit alors que l'OEM présente un caractère corpusculaire.

Les phénomènes corpusculaires engendrés par les OEM s'effectuent par absorption d'énergie électromagnétique et élimination du photon incident.

- Les **phénomènes ondulatoires** sont engendrés lors de la propagation des OEM à travers un milieu transparent d'indice de réfraction n tel que :

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda}{\lambda_i}$$

λ et λ_i longueurs d'onde de la radiation électromagnétique respectivement dans le vide et dans un milieu transparent.

Exemple de phénomène ondulatoire : la réfraction d'une radiation lumineuse monochromatique se propageant de l'air vers l'eau

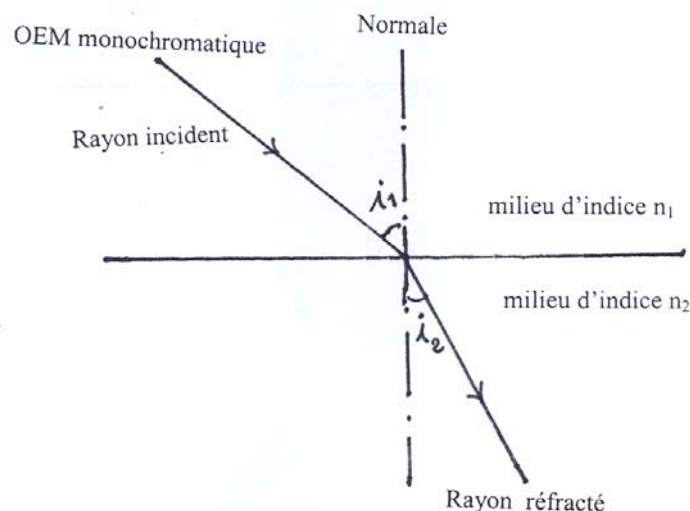


Figure 14

d'après la loi de Descartes sur la réfraction on a :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} \sin i_1 = \frac{\lambda}{\lambda_2} \sin i_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Les **phénomènes ondulatoires** font intervenir la longueur d'onde de l'OEM et s'effectuent sans échange d'énergie. Ces phénomènes montrent alors le caractère ondulatoire de l'OEM (voir également : diffraction et interférences des OEM) *

Conclusion : Une même OEM engendre, selon les circonstances :

- soit des phénomènes corpusculaires en échangeant l'énergie $h\nu$ avec la matière : ces phénomènes s'effectuent avec absorption d'énergie électromagnétique et montrent le caractère corpusculaire de l'OEM.
- soit des phénomènes ondulatoires lors de sa propagation dans un milieu transparent d'indice de réfraction n . Ces phénomènes font intervenir la longueur d'onde et s'effectuent sans échange d'énergie et montrent le caractère ondulatoire de l'OEM.

Ce double caractère corpusculaire et ondulatoire d'une même OEM est appelé **dualité onde-corpuscule d'une onde électromagnétique**.

2. DUALITE ONDE CORPUSCULE DES PARTICULES SUBATOMIQUES

Une particule subatomique interagit individuellement avec la matière en engendrant des phénomènes physique de deux natures différentes à savoir :

- les **phénomènes corpusculaires** qui font intervenir des transferts d'énergie :

Exemple :

L'ionisation d'un atome sous l'action d'un projectile chargé a d'énergie cinétique E_a est un phénomène corpusculaire qui résulte d'un transfert d'énergie cinétique du projectile à l'électron lié éjecté hors de l'atome avec une énergie cinétique notée $E_{e_{ion}^-}$. Si E_{a_1} est l'énergie résiduelle du projectile après une ionisation et E_l l'énergie de liaison de l'électron atomique la loi de conservation de l'énergie (20) permet d'écrire :

$$M_a c^2 + E_a + (m_{e^-} c^2 - E_l) = M_a c^2 + E_{a_1} + m_{e^-} c^2 + E_{e_{ion}^-}$$

$$E_a = E_{a_1} + E_l + E_{e_{ion}^-}$$

l'énergie transférée pour produire une ionisation est donc

$$E_a - E_{a_1} = E_l + E_{e_{ion}^-}$$

L'ionisation par particule chargée est similaire à l'ionisation par photon (voir l'effet photoélectrique).

Un phénomène corpusculaire telle l'ionisation montre le caractère corpusculaire d'une particule subatomique.

- Les **phénomènes ondulatoires** telle la diffraction des électrons ou des neutrons par des cristaux. Pour expliquer la diffraction de corpuscules subatomiques semblables à celles produites par les photons il faut attribuer à chaque corpuscule de masse m et de vitesse v une longueur d'onde $\lambda = \frac{h}{mv}$ appelée longueur d'onde de Louis de Broglie.

h : Constante de Planck

m : masse au repos si $v \ll c$

$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$: masse relativiste si v est comparable à c

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vide.

On démontre par ailleurs que le pouvoir de résolution du microscope électronique est fonction de la longueur d'onde λ associée à chacun des électrons accélérés qui bombardent l'échantillon étudié à l'aide ce microscope. Comme pour les ondes électromagnétiques, les corpuscules subatomiques font intervenir selon les circonstances soit leur caractère corpusculaire soit leur caractère ondulatoire ce double caractère est appelé dualité onde-corpuscule des particules subatomiques.