

République Algérienne Démocratique & Populaire
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté des sciences
Département de Physique

Physique 1

[Rappels de Cours et séries d'exercices]

A l'usage des étudiants de 1^{ère} année
Médecine dentaire

Présenté par :

NAFA Ouahiba

Année 2019/2020

Avant propos

Le présent manuel de rappel de cours & séries d'exercices du module intitulé « Physique 1 » est destiné en particulier aux étudiants de première année médecine dentaire, Il intéressera également les étudiants de médecine, pharmacie et biologie des universités algériennes. Il permettra aux étudiants d'acquérir des connaissances nécessaires et exigées conformément au programme officiel. Il correspond aux cours et TD que j'ai dispensés cette année au sein de la faculté de Médecine à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Les sujets sont abordés de manière générale et chaque étudiant pourra progresser et approfondir ses connaissances en utilisant les références indiquées à la fin du manuscrit, car ils contiennent d'autres détails importants non mentionnés dans ce manuel.

Module de Physique 1

Le module de physique 1 est la base de la physique médicale qui permet l'étude des phénomènes physiques liés à la médecine et à la biologie. Cette discipline constitue une interface entre la physique et les sciences médicales. Elle permet d'expliquer scientifiquement de nombreux processus qui se déroulent depuis l'échelle atomique, moléculaire, cellulaire, tissulaire, jusqu'à l'échelle organique.

O. Nafa

O. Nafa : Maître de conférences/Classe B, département de physique, faculté des sciences,

Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

Sommaire

Chapitre I

Les états physiques de la matière	3
I.1. Forces d'interaction intermoléculaires	3
I.2. Les différents états de la matière	4
I.3. Les changements d'état	8
I.4. Les solutions et leurs propriétés colligatives	13
Exercices	21

Chapitre II

Électricité	23
II.1. Électrostatique	23
II.2. Électrocinétique	39
II.3. Électrophorèse	42
Exercices	46

Chapitre III

Les bases de l'optique	49
III.1. Caractère ondulatoire de la lumière.....	49
III.2. La lumière blanche	51
III.3. Les lois de propagation de la lumière	53
III.4. Lois de Snell-Descartes dans les systèmes optiques.....	57
III.5. Le rayonnement Laser	59
III.6. La Spectrométrie optique	65
Exercices	69

Chapitre IV

Les rayonnements	71
IV.1. Définition et classement des rayonnements	71
IV.2. La radioactivité.....	72
IV.3. Les rayons X	76
IV.4. Interactions des rayonnements avec la matière	78
IV.5. Dosimétrie	84
IV.6. La radioprotection.....	87
Exercices	89

Chapitre V

Ondes sonores et ultrasonores	91
V.1. Les caractéristiques de l'onde sonore.....	91
V.2. Propriétés du son	94
V.3. Interactions de l'onde sonore avec la matière	95
V.4. Applications des ondes sonores	98
Exercices	102

Chapitre I

Les états physiques de la matière

Introduction

L'enjeu des sciences physiques est de comprendre, d'analyser, d'expliquer et de prédire le comportement de la matière qui constitue le monde qui nous entoure. Le but de ce chapitre, est d'étudier les différents états physiques et transformation de la matière et les propriétés colligatives des solutions.

La matière est tous substances/objets qui possèdent une masse et occupent un espace.

La matière à l'échelle microscopique se compose d'atomes ou de molécules. Elle peut exister, sous différents états, la différence résulte de la nature des interactions entre les molécules et la régularité dans la manière dont sont disposées les particules (ordonnées ou désordonnées).

I.1. Forces d'interaction intermoléculaires

Un état de la matière est la conséquence d'une compétition entre des forces d'attraction, qui tendent à rapprocher les particules, et des forces de répulsion qui tendent à les éloigner jusqu'à la dissociation.

I.1.1. Forces d'attraction

Les forces d'attraction entre particules sont : les forces entre les ions, les forces entre les molécules neutres et les forces entre les ions et les molécules.

a)- Forces entre ions

On parle de forces d'attraction quand les charges électriques des anions sont de signes opposés (anion et cation). La force d'attraction \vec{F} entre anions de charge q et un cation de charge q' distant de d obéissent à la loi de Coulomb et s'écrit :

$$\vec{F} = \frac{k q q'}{d^2} \vec{u}$$

K : constante et \vec{u} vecteur unitaire porté par la direction de d .

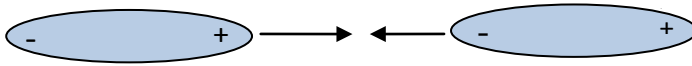
b)- Forces entre molécules neutres

Dans ce cas les forces de liaisons physiques sont les forces de Van Der Waals. Elles sont dues à l'inégalité de répartition des charges électriques positives (noyaux) et des charges électriques négatives (les électrons) à l'intérieur de la molécule. La structure de celle-ci est

telle que les barycentres des charges positives et négatives sont distinctes, ce qui rend la molécule polaire et se comporte comme un dipôle électrique capable d'attirer d'autres dipôles. Cette force est donnée par :

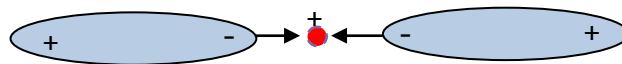
$$\vec{F} = \frac{k}{r^7} \vec{u}$$

r : distance entre les deux molécules.



c)- Forces entre ions et molécules

En présence des ions et des dipôles moléculaires, les ions attirent les parties des dipôles qui portent une charge opposée à la leur. Ils se trouvent, ainsi, entourer d'une ou de plusieurs molécules de solvant.



I.1.2. Forces de répulsion

Les forces responsables de l'éloignement entre les particules sont les forces de répulsion entre les charges électriques de mêmes signes et l'agitation thermique.

a)- Forces de répulsion intermoléculaire

Elles n'interviennent que lorsque les molécules sont très rapprochées. Ces forces sont dues à la règle d'exclusion de Pauli.

$$\vec{F} = \frac{k}{r^{13}} \vec{u}$$

b)- Agitation thermique (Brown 1827)

L'agitation thermique est la principale cause d'éloignement entre les molécules. Toute particule (atome, molécule, ion...) est spontanément soumise à une agitation désordonnée, c'est-à-dire, ces forces sont dirigées dans toutes les directions et leur intensité augmente de façon proportionnelle à la température absolue.

I.2. Les différents états de la matière

La matière peut exister, en général, sous trois états différents : état solide, état liquide et état gazeux (ou vapeur).

I.2.1. État gazeux

L'état gazeux de la matière est aussi appelé état vapeur. Un gaz est un ensemble d'atomes ou de molécules quasi-indépendants et constitué de particules très espacées, libres de rebondir partout, de forme et de volume variables (voir la Fig. 1). A basse pression, la plupart des gaz sont décrits par le modèle des gaz parfaits. Deux gaz différents sont automatiquement miscibles.

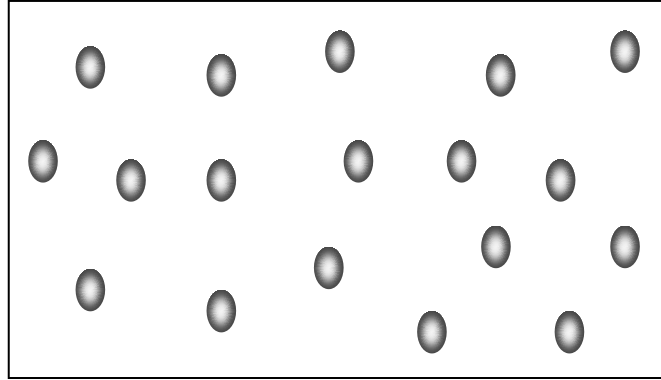


Fig.1. Représentation schématique d'un gaz.

a) Définition d'un gaz parfait

Un gaz parfait est constitué de particules identiques, ponctuelles et sans interactions entre-elle. Les seules interactions que subissent les particules sont les chocs avec la paroi de l'enceinte contenant le gaz. Le gaz parfait est à l'équilibre thermodynamique (la température est la même en tout point et constante), il est homogène et isotrope (ses propriétés physiques ne changent pas quelle que soit sa direction).

b) Équation d'état d'un gaz parfait

Un gaz parfait vérifie l'équation d'état suivante :

$$PV = nRT$$

où :

- P est la pression exercée par le gaz en un point donné exprimée en Pa ;
avec : $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$, $1 \text{ at.m} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1,013 \text{ bar} = 760 \text{ mmHg}$.
- V est le volume de l'enceinte contenant le gaz donné en m^3 .
 $1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3 = 1 \text{ dm}^3$, $1 \text{ mL} = 10^{-6} \text{ m}^3 = 1 \text{ cm}^3$;
- n est le nombre de moles du gaz qui correspond à la quantité de matière dans l'enceinte, son unité est (mol).

Une mole de matière contient $6,022 \cdot 10^{23}$ particules, ce nombre est appelé le nombre d'Avogadro (N_A).

- R est la constante des gaz parfaits, sa valeur est $8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$;
- T est la température absolue du gaz en Kelvin (K).

L'échelle de température Celsius qu'on utilise couramment est simplement décalée en origine par rapport à l'échelle Kelvin : si on note T la température absolue en K et on note θ la température en $^{\circ}\text{C}$, on obtient la relation : $T = \theta + 273,15 \text{ K}$.

Exercice d'application

On considère une enceinte de volume $V = 10 \text{ l}$ à la température $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ qui contient une quantité de matière $n = 0,5 \text{ mol}$ de gaz de diazote (N_2). Calculer la pression P dans l'enceinte ?

Il faut d'abord convertir les données dans les unités du système international :

$V = 10 \text{ l} = 0,01 \text{ m}^3$, $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C} = 298,15 \text{ K}$ et $n = 0,5 \text{ mol}$.

On utilise l'équation : $PV = nRT \Rightarrow P = \frac{nRT}{V}$.

$$\text{AN : } P = \frac{0,5 \cdot 8,314 \cdot 298,15}{0,01} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Pa.}$$

I.2.2. État liquide

Les atomes/molécules au sein d'un liquide sont en interaction attractive faible. Les particules du liquide restent quasiment en contact les unes des autres. Cela rend le liquide peu compressible (volume constant). La structure comporte de nombreux vides qui permettent aux particules de se déplacer, ce qui donne au liquide la propriété d'être fluide (sans forme appropriée).

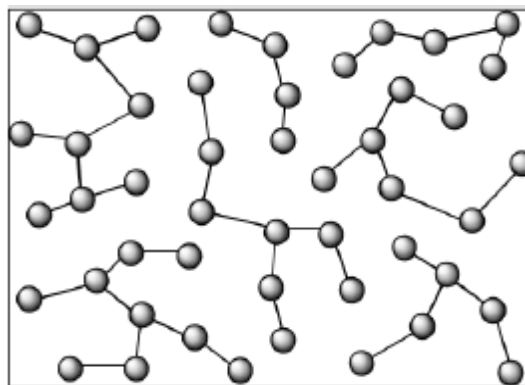


Fig.2. Représentation schématique d'un liquide.

Remarque

Deux liquides peuvent être miscibles et forment une seule phase ou ne pas être miscibles et forment deux phases distinctes.

Exemples : (1) eau + vinaigre sont miscibles.

(2) eau+huile sont non miscibles.

I.2.3. État solide

Un solide est constitué de particules en forte interaction les unes avec les autres. Elles ne se déplacent pas mais vibrent autour des positions fixes. Les atomes du solide forment une phase condensée, difficilement compressible (volume fixe), disposées de manière irrégulière (solide amorphe) ou selon un arrangement bien défini qui se répète à l'identique (solide cristallin).

a) les solides ordonnés « les cristaux »

Un solide cristallin est constitué d'un ensemble de particules – atomes ou molécules – reliées les unes aux autres et disposées selon un arrangement bien défini qui se répète dans tout le cristal qu'on appelle la maille du réseau. L'état cristallin représente l'état de la matière le plus ordonné possible donc le plus stable.

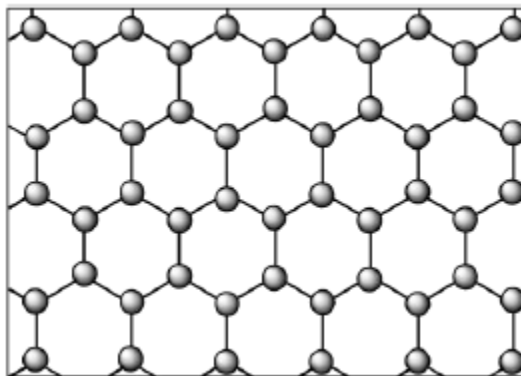


Fig.3. Représentation schématique d'un solide cristallin.

Les mailles se répètent et contiennent le même nombre de molécules ou d'atomes.

b) les solides désordonnés « les amorphes »

Un solide amorphe est constitué d'un ensemble de particules – atomes ou molécules – reliées les unes aux autres et disposées de manière irrégulière, exactement comme dans un liquide quoique les particules d'un solide amorphe ne se déplacent pas mais elles sont figées dans un état désordonné. Comme les liquides, les structures amorphes présentent un ordre à faible distance, car les particules sont au contact les unes des autres.

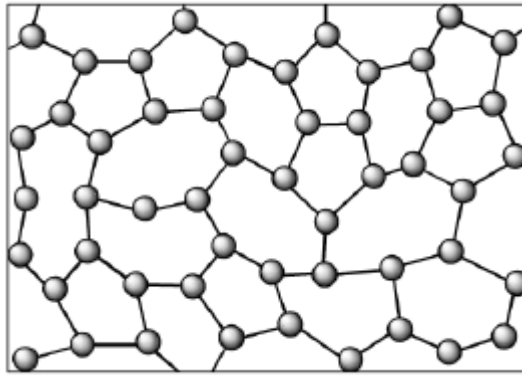


Fig.4. Représentation schématique d'un solide amorphe.

c) Polymères

Un matériau polymère est constitué de molécules de grande dimension contenant jusqu'à quelques milliers d'atomes. Ces chaînes macromoléculaires se forment par polymérisation (adjonction de petites unités, appelées monomères, les unes aux autres). On distingue les homopolymères, formés à partir d'un unique monomère et les copolymères, formés à partir de monomères différents.

Exemples de polymères naturels :

- La cellulose, constituant les parois des cellules végétales et principal constituant du bois.
- Les protéines.
- Le caoutchouc naturel.

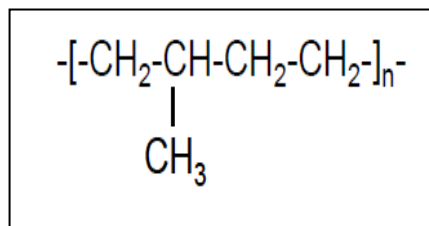


Fig.5. monomère de Poly(éthylène propylène) PEP.

I.3. Les changements d'état

En fonction des conditions de température et de pression, un corps pur, dans un état donné, peut rester stable ou passer spontanément d'un état à un autre. Ce type de transformation s'appelle une transition de phase ou changement d'état.

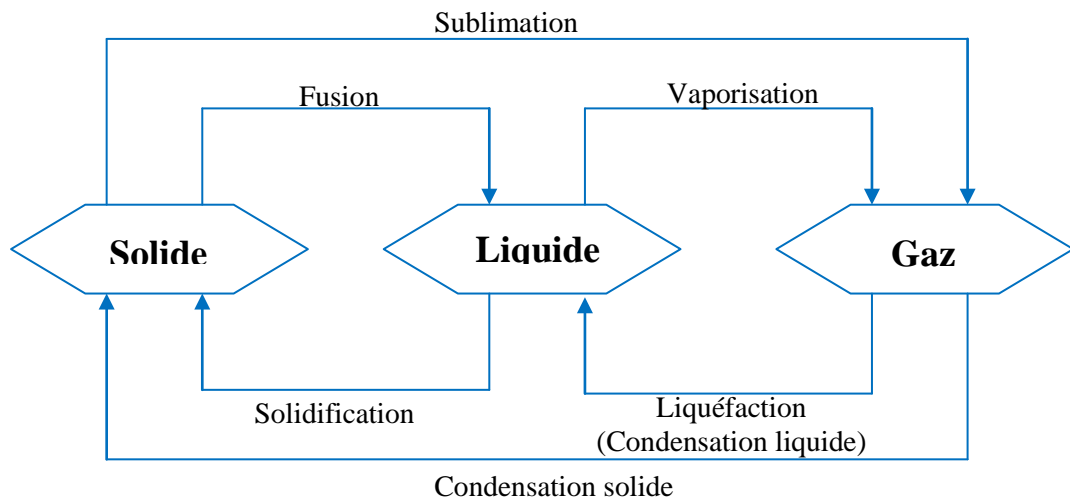


Fig.6. Transition du corps d'une phase à une autre.

Exemples

- À pression atmosphérique, l'eau liquide est stable à 25 °C, en revanche la température descend en dessous de 0 °C, l'eau liquide se transforme spontanément en eau solide : c'est un changement d'état.
- Il faut fournir de l'énergie pour provoquer le passage d'une phase, où les interactions sont fortes, vers une autre phase, où les interactions sont plus faibles, comme par exemple la transition de l'état solide à l'état gazeux : l'énergie fournie permet de rompre les interactions entre les molécules.
- À l'inverse, le passage d'une phase, où les interactions sont faibles, vers une phase, où les interactions sont plus fortes, s'accompagne d'un dégagement d'énergie, comme par exemple, la transition de l'état gazeux à l'état liquide.

I.3.1. L'énergie nécessaire pour un changement d'état

L'énergie (chaleur) Q nécessaire pour passer d'un état à un autre est donnée par :

$$\text{Solide} \rightarrow \text{Liquide} : Q = m \times L_f.$$

$$\text{Liquide} \rightarrow \text{Solide} : Q = - m \times L_f.$$

$$\text{Liquide} \rightarrow \text{Gaz} : Q = m \times L_v.$$

$$\text{Gaz} \rightarrow \text{Liquide} : Q = - m \times L_v.$$

Q : la quantité de chaleur exprimée en Joule (J), m : la masse en Kg, L_f : la chaleur latente de fusion en J/Kg, et L_v : la chaleur latente de vaporisation en J/Kg.

- L'énergie nécessaire dépend du matériau.
- L'énergie nécessaire dépend de type de changement d'état.

- L'énergie nécessaire est proportionnelle à la quantité de matière.

I.3.2. La chaleur latente

La chaleur latente est l'énergie nécessaire pour que 1 kg de substance passe d'un état vers un autre (change son état).

Exemples

<i>Changement d'état</i>	<i>Chaleur latente, en [J/Kg]</i>
fer solide → fer liquide	247 000
fer liquide → fer gazeux	6 280 000
eau liquide → vapeur d'eau	2 300 000
eau gelée → eau liquide	334 000

Applications

- 1) Calculer l'énergie nécessaire pour fondre entièrement une tonne de glace ?
- 2) Calculer l'énergie libérée lorsque 15 grammes de vapeur d'eau se liquéfient ?

I.3.3 Température de changements d'état

La chaleur fournie à un corps soit élève la température de ce corps, soit lui fait subir un changement d'état. Pour une pression P fixée, lorsque deux phases d'un même corps pur coexistent, la température ne peut prendre qu'une valeur unique, appelée température de changement d'état à la pression P .

- Pendant un changement d'état, la température ne varie pas.
- Les changements d'état correspondent à des paliers de température.

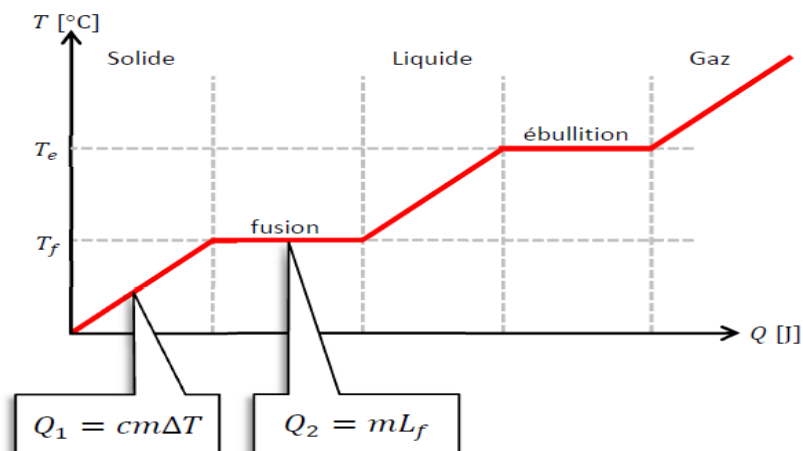


Fig.7. Variation de la température en fonction de la chaleur lors d'un changement de phase.

- Température du changement d'état (solide \longrightarrow liquide) : température de fusion.
- Température du changement d'état (liquide \longrightarrow gaz) : température d'ébullition ou de vaporisation.
- Température du changement d'état (solide \longrightarrow gaz) : température de sublimation.

Ces températures dépendent de la nature du corps et de la pression environnante. Par exemple pour l'eau, la température d'ébullition varie en fonction de la pression comme indiquée sur la figure suivante :

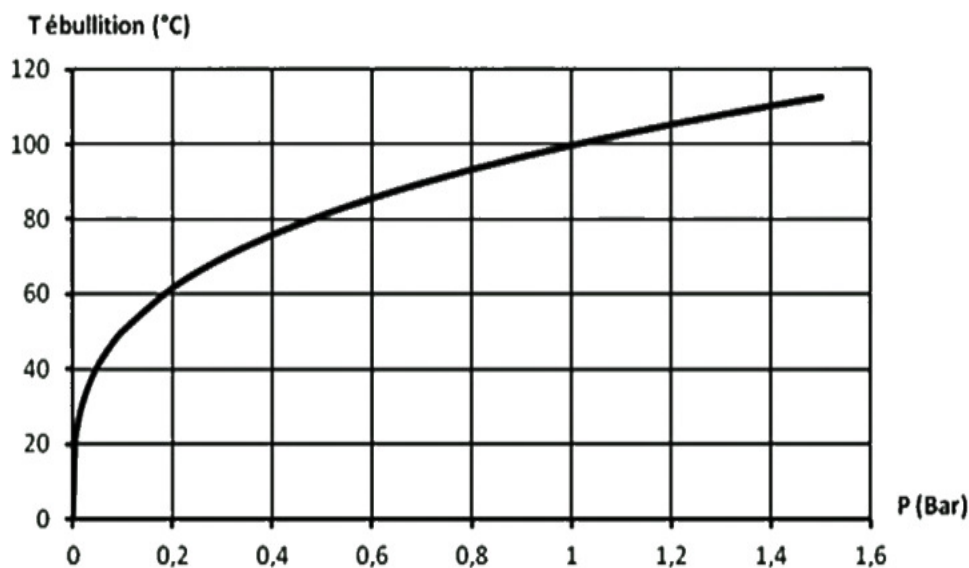


Fig.8. Variation de la température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression.

I.3.4. Transfert thermique et température

Lorsque deux corps de températures différentes sont mis en contact, le corps le plus froid reçoit de l'énergie du corps le plus chaud par transfert thermique. Le transfert cesse lorsque les deux corps sont à la même température : on parle alors d'*équilibre thermique*.

Si deux objets A et B de températures différentes échangent de l'énergie sous forme de transfert thermique ; la température du corps le plus chaud A diminue de T_1 à T_2 et celle du corps B le plus froid augmente de T_3 à T_4 : le corps chaud cède au corps froid une énergie thermique conformément à la loi suivante :

$$Q = -m_A \cdot c_{mA} (T_2 - T_1) = m_B \cdot c_{mB} (T_4 - T_3)$$

où c_m désigne la capacité thermique massique en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$. Par convention, $Q_A < 0$ car A cède de l'énergie. Cette relation n'est valable qu'en l'absence de changement d'état.

Exemples de quelques capacités thermiques :

corps	état physique	C_m ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
diazote	gaz	1 040
éthanol	liquide	2 460
eau	gaz	1 850
eau	liquide	4 186
eau	solide	2 060

I.3.5. Diagramme de phases ou d'états

On appelle diagramme de phases ou d'états une courbe qui résume les relations entre phases solide, liquide et gaz d'une substance. Il permet de connaître l'état d'une matière à pression et à température données.

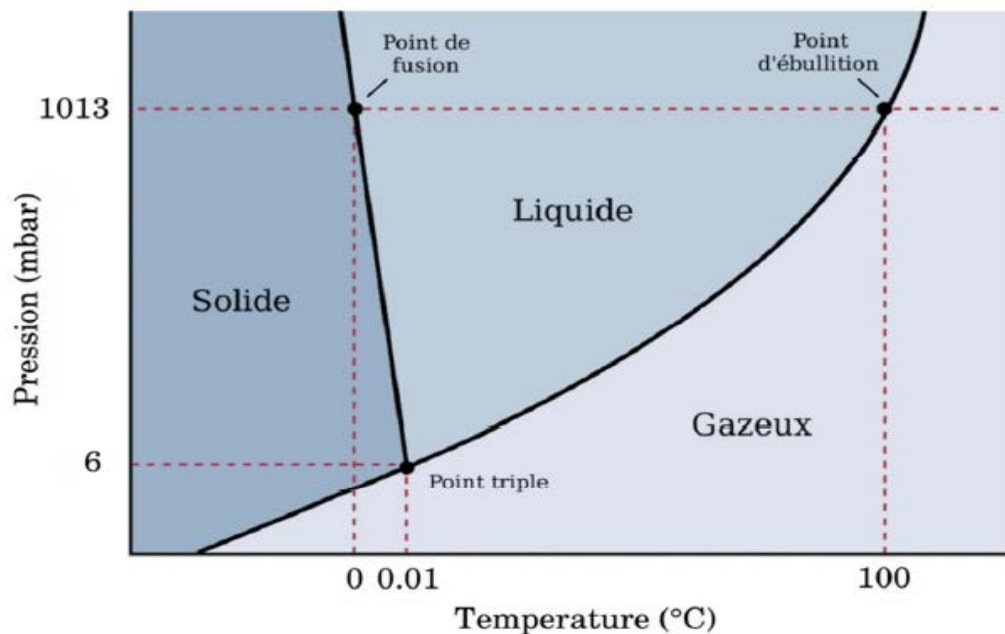


Fig.9. Diagramme de phases ou d'états.

Les courbes de changement d'état correspondent à l'ensemble des couples de valeurs (P,T) , où la coexistence de deux phases est observée :

- Coexistence solide-liquide : courbe de fusion.
- Coexistence liquide-gaz : courbe d'ébullition ou de vaporisation.
- Coexistence solide-gaz : courbe de sublimation.

- Le point triple (P_t) représente les uniques valeurs de pression et de température pour lesquelles les trois phases solide, liquide et gaz peuvent coexister.

Dans le cas de l'eau par exemple, le point triple où les 3 phases coexistent est pour :

$$P_t = 612 \text{ Pa} \text{ et } T_t = 273,16 \text{ K.}$$

I.4. Les solutions et leurs propriétés colligatives

I.4.1. Généralités sur les solutions

- Un corps pur est formé d'un seul constituant.
- L'introduction dans un même récipient de deux ou plusieurs substances (corps), qui n'ont pas forcément le même état, forment un mélange qui peut être homogène ou hétérogène.

- Mélange homogène

Le mélange est homogène si les substances ou les espèces chimiques qui le composent sont dans la même phase. La dispersion totale d'un corps dissous dans un milieu convenable forme un mélange homogène. L'évaporation et la distillation permettent de séparer les constituants d'un mélange homogène.

- Mélange hétérogène

Un mélange est hétérogène si les espèces chimiques qui le composent sont dans des phases différentes. Un mélange est hétérogène si on peut distinguer les différents constituants.

La filtration ou la décantation permet de séparer les différents constituants d'un mélange hétérogène.

- **Une solution** : est un mélange homogène d'au moins deux substances et d'une seule phase. Elle est constituée d'un solvant et d'un ou de plusieurs solutés.

- **Un solvant** : Constituant qui est présent en plus grande quantité et qui se trouve dans le même état physique que la solution généralement un liquide.

- **Un soluté** : Toute substance qui peut être dissoute dans le solvant. Elle peut être solide, Liquide ou gaz.

- **Une solution idéale** : est une solution dont le volume est égal à la somme du volume de solvant et des volumes des solutés : il n'y a pas d'interaction entre les molécules de solvant et les molécules des solutés.

Lorsque le solvant utilisé est de l'eau, on appelle cette solution une solution aqueuse.

Dans les milieux biologiques le solvant est généralement l'eau. Les milieux biologiques sont des solutions aqueuses.

- L'eau dans l'organisme

L'eau est le constituant le plus abondant des êtres vivants. Dans l'espèce humaine l'eau représente environ 60 et 70% du poids corporel. Ce pourcentage varie d'un individu à un autre (entre femme/homme, grand/petit et obèse/maigre).

I.4.2. Concentration des solutions

La concentration d'une solution correspond à la quantité de soluté dissoute par rapport à la quantité totale de solution. Elle s'exprime en différentes unités.

a. Fraction molaire x_i

Si on considère un système composé d'un mélange de constituants ; la fraction molaire x_i d'un constituant i est égale au rapport du nombre de moles n_i de ce constituant i sur le nombre total de moles de l'ensemble des constituants n : elle est donc une grandeur sans dimension.

$$x_i = \frac{n_i}{n}$$

Avec $n = \sum_i n_i$, on constate que $\sum x_i = 1$.

b. Concentration massique ou pondérale ($C_{\text{pondérale}}$)

La concentration massique d'une solution est la masse de soluté contenue dans un litre de cette solution. On la note C_m (ou C_p). La C_p s'exprime généralement en (g/l) ou en (Kg/m³).

$$C_m = C_p = \frac{m_i}{V}$$

m_i est la masse de soluté i et V est le volume de la solution.

c. Concentration molaire d'une solution ou molarité (C_{molaire})

La concentration molaire d'une solution est la quantité de matière de soluté contenue dans un litre de solution. On la note généralement C .

$$C = C_{mol} = \frac{n_i}{V}$$

Sachant que $n_i = \frac{m_i}{M}$ (m_i masse de soluté et M masse molaire).

Le n_i représente le nombre de moles d'un constituant i (de soluté i) et V volume total de la solution.

La C_{mol} s'exprime généralement en mole par litre (mol/l), ou en sous-unités. On la note entre deux crochets. La concentration d'un élément X donné s'écrit :

$C = [X]$. Elle est appelée aussi molarité.

Remarques

1) Souvent, on utilise la normalité d'une solution (noté N). Elle est définie comme étant le nombre d'éléments actifs par litre de solution $\Rightarrow N = C_{mol}$.

2) Lorsque l'on voudra rendre compte de la concentration molaire d'un ion dans une solution, on notera cette concentration entre crochets. Par exemple, on notera $C(\text{NaCl})$ la concentration d'une solution d'eau salée. Alors que l'on notera $[\text{Na}^+]$ la concentration de l'ion sodium dans cette solution.

- Relation entre C et la concentration massique C_m d'une solution

$$\text{On a : } C = \frac{n}{V} = \frac{\frac{m}{M}}{V} = \frac{m}{MV} \Rightarrow V = \frac{m}{MC} \quad (1)$$

$$\text{Et } C_m = \frac{m}{V} \Rightarrow V = \frac{m}{C_m} \quad (2)$$

Les équations (1) et (2) donnent $\frac{m}{MC} = \frac{m}{C_m}$ d'où la relation :

$$C = \frac{C_m}{M}, \text{ ou } C_m = C \times M .$$

d. Concentration molale ou molalité (C_{molale})

La concentration molale appelée aussi la molalité est donnée par :

$$C_{molale} = \frac{n_i}{M} .$$

n_i désigne le nombre de moles du soluté i et M la masse du solvant.

La C_{molale} s'exprime donc en mole par Kg de solvant, ou par ses sous unités.

e. Le titre τ d'une solution

Il nous renseigne sur la proportion en masse du soluté par rapport à la masse totale de moles en solution (solvant + solutés).

$$\tau = \frac{m_i}{m}, \text{ avec } m = \sum m_i .$$

Exemple

On dissout 10 g d'iodure de potassium KI ($M_{KI} = 166 \text{ g/mol}$) dans un litre d'eau ($M_{H_2O} = 18 \text{ g/mol}$). Alors,

- La molarité est : $C_{mol} = \frac{n}{V} = \frac{\frac{m}{M}}{V} = \frac{m}{MV} = \frac{10}{166.1} = 0.0602 \text{ mol/l.}$

- La molalité est : un litre d'eau = 1 Kg d'eau $\Rightarrow C_{mol} = 0.0602 \text{ mol/Kg.}$

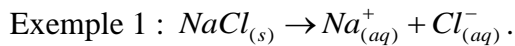
- Le titre de la solution est : $\tau = \frac{m_i}{\sum m_i} = \frac{10}{10+1000} = 0.01 = 1\% \text{ en masse de } KI.$

- La fraction molaire de KI est donnée par :

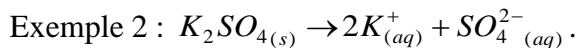
$$x_i = \frac{n_i}{\sum n_i} = \frac{10/166.1}{10/166.1 + 1000/18} = 0.001 = 0.1\%$$

f. Osmolarité-osmolalité

- **Osmole** : est le nombre de moles d'ions en lesquels un soluté s'est dissocié.



Alors le $NaCl$ s'est dissocié en deux (2) moles, c'est à dire en deux (2) osmoles.



Le K_2SO_4 s'est dissocié en deux (2) moles de K^+ et une (1) mole de SO_4^{2-} c'est à dire au totale en trois (3) osmoles.

- Concentration osmolaire (osmolarité)

Appelée aussi le nombre de moles particulières, elle représente le nombre de particules par volume de solution.

Considérons une solution électrolytique contenant un seul soluté à la concentration C_M .

Soit γ le nombre d'ions fournis par la dissociation d'une seule molécule de soluté, et α le degré de dissociation du soluté dans le solvant.

- Si $\alpha = 1$, la dissociation est totale et la solution contient uniquement des ions.

-Si $\alpha < 1$, La dissociation est partielle et la solution contient des ions et des molécules non dissociées aussi.

Le nombre de moles du soluté dissocié est : $\alpha.C_M$.

Le nombre de moles d'ions dans la solution est : $\gamma.\alpha.C_M$.

Le nombre de moles du soluté non dissocié : $C_M - \alpha.C_M$.

On définit la concentration molaire particulière ou osmolarité ω comme étant le nombre de moles de particulières (molécules et ions) par litre de solution.

$$\omega = C_M [1 + \alpha(v - 1)]$$

Son unité est osmol/l, ou bien mosmol/l.

Si on pose : $i = 1 + \alpha(v - 1) \Rightarrow \omega = i C_M$.

i est le coefficient d'ionisation de Van't'Hoof. Il est défini comme le rapport entre le nombre de particules (molécules et ions) et le nombre total initial de molécules introduites dans le solvant.

- Concentration osmolale (osmolalité)

Elle est définie comme étant le nombre de particules par la masse de la solution, son unité est osmol/kg. Elle représente la somme des concentrations molales des différents solutés d'une solution.

h. La dilution

La dilution est l'ajout d'un solvant dans une solution pour diminuer sa concentration.

La solution finale est appelée solution fille par contre la solution initiale est dite solution mère. Lors de la dilution, la quantité de matière n de soluté est conservée, elle est donnée par la loi de dilution suivante :

$$C_f \times V_f = C_i \times V_i = n$$

C_i et V_i sont la concentration molaire et le volume de la solution mère (initiale).

C_f et V_f sont la concentration molaire et le volume de la solution fille (finale).

Exemple d'application

On ajoute sans variation de volume 80 ml d'eau à 20 ml d'eau sucrée à 80 g/l.

Que devienne la concentration massique de la nouvelle solution ?

Au cours d'une dilution il n'y a pas de variation de quantité de matière,

m (sucre) initiale = m (sucre) finale

Comme la concentration massique est telle que : $C = m/V$ alors :

$$C_i \cdot V_i = C_f \cdot V_f$$

$C_f = C_i (V_i/V_f)$, avec $V_i = 20$ ml et $V_f = 20 + 80 = 100$ ml

Application numérique : $C_f = 80 \times 20 / 100 = 16$ g/l.

I.4.2. Propriétés colligatives des solutions

Si on compare le comportement de la solution par rapport au solvant en ce qui concerne les

changements (Fig.10) On constate la différence entre les pressions de vapeur de la solution et du solvant ΔP , et une différence entre leurs températures de congélation ΔT .

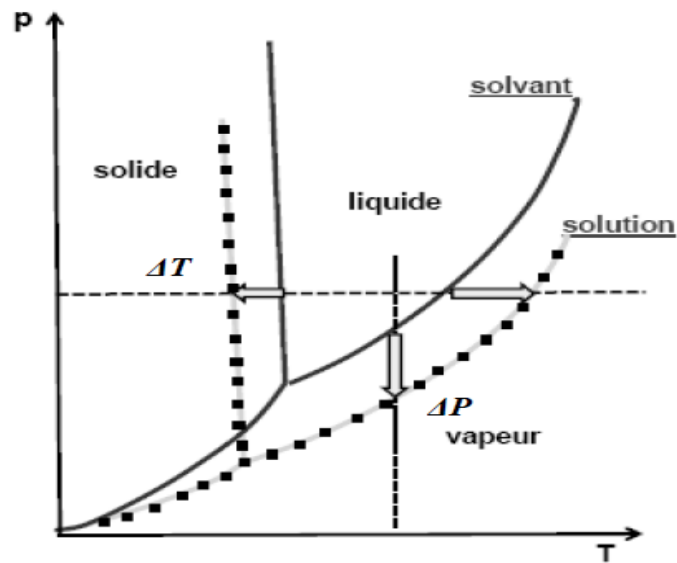


Fig.10. Diagramme de phases du solvant et de la solution.

Plusieurs propriétés importantes des solutions dépendent du nombre de particules de soluté en solution et non de leur nature. On les appelle propriétés colligatives. Ces dernières sont : la diminution de la pression de vapeur (la tonométrie), l'abaissement du point de congélation (la cryoscopie), l'augmentation du point d'ébullition (l'ébullioscopie) et La pression osmotique de la solution.

a. L'abaissement de la pression de vapeur d'une solution (la tonométrie)

Lorsqu'un composé est dissout dans un solvant, il se forme des forces d'attraction entre le soluté et le solvant, ce qui permet la formation de la solution. Ces forces d'attraction s'ajoutent aux liaisons déjà présentes pour retenir encore plus fortement le solvant en phase liquide et diminuer la pression de vapeur de ce dernier au-dessus de la solution.

Quantitativement, cet effet est décrit par la loi de Raoult :

$$P_{\text{solvant}} = x_{\text{solvant}} P^{\circ}_{\text{solvant}}$$

Le P_{solvant} est la pression de vapeur du solvant au-dessus d'une solution diluée. Le x_{solvant} est la fraction molaire du solvant et $P^{\circ}_{\text{solvant}}$ est la pression de vapeur du solvant pur.

On peut remplacer x_{solvant} par $(1-x_{\text{soluté}})$:

$$P_{\text{solvant}} = (1 - x_{\text{soluté}}) P^{\circ}_{\text{solvant}}$$

On obtient cette équation :

$$P^o_{\text{solvant}} - P_{\text{solvant}} = x_{\text{soluté}} P^o_{\text{solvant}} = \Delta P_{\text{solvant}}$$

b. L'abaissement de point de congélation (la cryoscopie)

La dissolution d'un soluté a pour effet de diminuer le point de congélation de la solution. Expérimentalement, l'abaissement du point de fusion (ΔT_{cong}) est proportionnel à la concentration du soluté :

$$\Delta T_{\text{cong}} = -i C_{\text{molal}} K_{\text{cong}}$$

K_{cong} est la constante cryoscopique, qui est caractéristique du solvant uniquement ; C_m est la molalité et i est le nombre d'osmoles.

c. L'élévation du point d'ébullition (l'ébullioscopie)

L'ajout d'un soluté dans un solvant a aussi pour effet d'augmenter le point d'ébullition de la solution par rapport au solvant pur. L'élévation du point d'ébullition ($\Delta T_{\text{éb}}$) est également proportionnelle à la concentration de soluté :

$$\Delta T_{\text{éb}} = i C_{\text{molal}} K_{\text{éb}}$$

$K_{\text{éb}}$ est la constante d'ébullioscopique, qui dépend de la nature du solvant.

e. La pression osmotique

L'osmose est le transfert net des molécules d'un solvant pur à travers une membrane semi-perméable d'une solution moins concentrée vers une solution plus concentrée. Ce phénomène est très important pour le transport des nutriments et l'élimination des déchets au niveau cellulaire.

La Pression osmotique (notée π) est la pression minimale nécessaire pour faire cesser l'osmose, c'est-à-dire la pression qu'il faut exercer sur la solution pour empêcher le solvant de traverser la membrane. Le solvant traverse la membrane et ce flux ne s'arrête que lorsque les forces de pression exercées de part et d'autre de la membrane soient équilibrées.

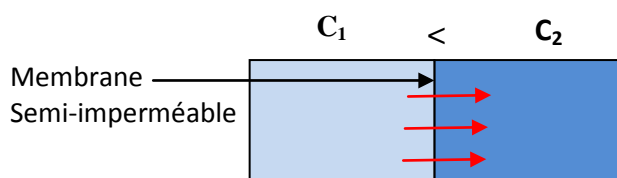


Fig.11. Passage de l'eau du milieu le moins concentré vers le milieu le plus concentré

$$\pi V = nRT \Rightarrow \pi = (n/V)RT = iCRT = \omega RT \quad (\text{loi de Vant'Hoff}).$$

i est le coefficient de Van't Hoff.

C = concentration de l'espèce dissoute (M).

R = constante des gaz parfaits (elle vaut 8.31 J/mol K).

T = température absolue en Kelvin

π = pression osmotique en Pascal (Pa)

$\omega = iC$ = osmolarité de la solution

Exemple d'application

Calculons la pression osmotique développée par rapport à l'eau pure pour une solution aqueuse de glucose 0.01 mol/L à 25 °C

Sachant que : $i_{\text{glucose}} = 1$, $C_{\text{glucose}} = 0.01 \text{ mol/l}$, $R = 8.31 \text{ J/mol K}$ et $T = 298 \text{ K}$.

$$\pi = (n/v) RT = iCRT = 1 \cdot 0.01 \cdot 8.31 \cdot 298 \cdot 1000 = 2.48 \cdot 10^4 \text{ Pa.}$$

On sait que $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} \Rightarrow \pi_{\text{glucose}} = 2.48 \times 10^4 \text{ (Pa)} = 0.24 \text{ atm}$. L'eau pure tend donc à diffuser dans le compartiment contenant le glucose. Il faut appliquer une pression supplémentaire $\pi = 0.24 \text{ atm}$ sur le compartiment 1 pour rétablir l'équilibre des pressions.

Exercices

Exercice 1

- 1) Exprimer la masse volumique ρ d'un gaz parfait en fonction de sa masse molaire M .
- 2) En déduire l'expression de la densité d'un gaz parfait en fonction de sa masse molaire C_m et de la masse molaire de l'air C_{air} .

Rappel : la densité d'un gaz est le rapport entre la masse volumique ρ de ce gaz et la masse volumique ρ_{air} ($d = \rho/\rho_{air}$) dans les mêmes conditions de température et de pression).

- 3) Sachant que l'air est composé d'environ 80 % de diazote et 20 % de dioxygène, déterminer la masse molaire de l'air C_{air} .
- 4) En déduire la densité du méthane CH_4 considéré comme un gaz parfait.

Données : $M_H = 1 \text{ g mol}^{-1}$, $M_C = 12 \text{ g mol}^{-1}$, $M_N = 14 \text{ g mol}^{-1}$, $M_O = 16 \text{ g mol}^{-1}$.

Exercice 2

- a) Un morceau de 250 g de glace à -12°C est entièrement transformé en vapeur.
- Calculer la quantité de chaleur nécessaire pour réaliser cette opération.
- b) Un récipient contient 400 g de glace à une température de -18°C . Quelle quantité minimale d'eau à 60°C faut-il verser dans ce récipient pour en faire fondre toute la glace ?

Exercice 3

- a) Un litre d'une solution renferme :
5.85 g de NaCl (de masse molaire = 58.5 g/mol), 3.28 g de PO_4Na_3 (M=164 g/mol), 9 g de glucose (M=180 g/mol) et 0,6 g d'urée (M=60 g/mol).
- Calculer la molarité, l'osmolarité de la solution.
- b) Une solution aqueuse de $CaCl_2$ à la concentration 0,1 mol/l et un degré de dissociation égal 0,6.
- Déterminer son osmolarité. Que se passe-t-il si l'on dilue 1ml de cette solution dans 99 ml d'eau (on suppose le sel est totalement dissocié).

Exercice 4

Trouver le point de congélation d'une solution qui contient 0,2 mol d'un soluté non volatil dans 1200 g de benzène.

Le point de congélation du benzène est 5.5 °C. $K_c = 5,12 \text{ °C Kg mol}^{-1}$.

Exercice 5

La dissolution de 1,6 g d'urée ($M = 60,1 \text{ g/mol}$) dans 120 g de solvant produit une solution dont le point d'ébullition est de 0,12°C supérieur à celui du solvant pur. Calculer la constante ébullioscopique de ce solvant.

Exercice 6

Quelle est la différence de pression osmotique entre une solution de glucose 0.01 (mol) et une solution de NaCl de 0,01 mol à 25 °C ?

Chapitre II

Électricité

Introduction

L'électricité est la partie de la physique qui étudie l'ensemble des phénomènes causés par une ou plusieurs charges électriques.

Exemples d'application

- En biophysique : les membranes biologiques sont des milieux isolants placés entre deux milieux conducteurs (condensateurs). Elles permettent une séparation de charges.
- En biochimie : les protéines sont formées d'acides aminés dont certains sont chargés. La répartition de charges va guider les interactions intermoléculaires.
- Explique certains phénomènes liés au fonctionnement du corps humain comme l'électrocardiographie (technique d'enregistrement des potentiels électriques du myocarde (ECG)) et l'électroencéphalographie (technique d'enregistrement des potentiels électriques au niveau du cerveau (EEG)).

II.1. Électrostatique

L'électrostatique est l'étude de l'ensemble des phénomènes créés par des charges électriques immobiles.

II.1.1. Charge électrique

La matière est constituée de charges électriques positives (les protons) et de charges négatives (les électrons).

- Si le nombre de charges positives est égal au nombre de charges négatives, le corps est électriquement neutre.
- Si le nombre de charges positives est supérieur au nombre de charges négatives le corps est électriquement positif.
- Si le nombre de charges positives est inférieur au nombre de charges négatives le corps est électriquement négatif.

La charge électrique (positive ou négative) est une propriété de la matière qui lui fait produire et subir des effets électriques et magnétiques.

La charge électrique est quantifiée : $Q = \pm n \times e^-$, où n est un entier et $e^- = -1.6 \cdot 10^{-19}$ C. Les charges ponctuelles sont supposées sans dimension.

Un corps chargé porte, en général, un grand nombre de charges élémentaires, sa charge électrique présente donc un aspect continu. On a trois types de distributions de charges.

- i) Distribution linéaire sur un fil : $\lambda = dq/dl \Rightarrow dq = \lambda dl$ (λ est la densité linéique en C/m).
- ii) Distribution surfacique sur une surface : $\sigma = dq/ds \Rightarrow dq = \sigma ds$ (σ est la densité surfacique en C/m²).
- iii) Distribution volumique dans un volume : $\rho = dq/dV \Rightarrow dq = \rho dV$ (ρ est la densité volumique en C/m³).

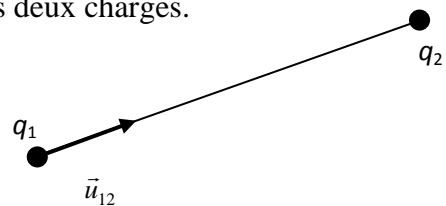
II.1.2. Force électrique (Loi de Coulomb)

La loi de Coulomb exprime la force entre deux charges ponctuelles. Les propriétés de la force électrostatique exercée par une charge q_1 sur une autre charge q_2 sont comme suit:

- La force est dirigée selon la droite qui joint les deux charges électriques.
- Elle est proportionnelle au produit des charges.
- La force est dite attractive si les charges sont de signes opposées et répulsive si elles sont de même signe.
- Elle varie comme l'inverse du carré de la distance entre les deux charges.

$$\vec{F}_{1/2} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_{12} = -\vec{F}_{2/1}; \quad \|\vec{F}_{1/2}\| = \|\vec{F}_{2/1}\|$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ (N.m}^2\text{C}^{-2}\text{)}.$$



\vec{u}_{12} : est un vecteur unitaire dont la direction est la droite passant par q_1 et q_2 et orienté de q_1 vers q_2 .

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ (C}^2 / \text{N.m}^2\text{)}$ est la permittivité électrique du vide (Farad/m).

La permittivité électrique est une grandeur liée à la réaction d'un milieu face à une interaction électrostatique, l'intensité de la force dépend de la nature du milieu, vide, eau, air, ...

Cette loi est valable que pour les charges immobiles et dans le vide. Dans un milieu matériel (autre que le vide) on a : $\vec{F}_{1/2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2} \vec{u}_{12}$

Avec $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ϵ_r est la permittivité relative du milieu.

Pour un ensemble de charges q_i ($i = 1$ à n), la force qu'exerce cet ensemble de charges sur une

charge q est donnée par $\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = k \sum_{i=1}^n \frac{q q_i}{r_i^2} \vec{u}_i$, r_i est la distance entre q et q_i .

II.1.3. Champ et potentiel électriques

La présence d'une charge électrique dans l'espace permet de définir deux propriétés de l'espace ; une propriété vectorielle représentant le champ électrostatique et une propriété scalaire associée au potentiel électrostatique.

a) Champ électrique

Si on place une charge électrique ponctuelle dans un espace et qu'elle subit une force électrique, on dit qu'il y a un champ électrique dans cet espace. On note l'intensité de ce champ par \vec{E} .

- Champ créé par une charge ponctuelle

Soit une charge q dans l'espace.

Elle crée au point M distant de r un champ électrique caractérisé par un vecteur

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \vec{u}.$$

Si $q > 0$ le champ \vec{E} se dirige de la charge q vers l'extérieur.

Si $q < 0$ le champ \vec{E} se dirige vers la charge q .

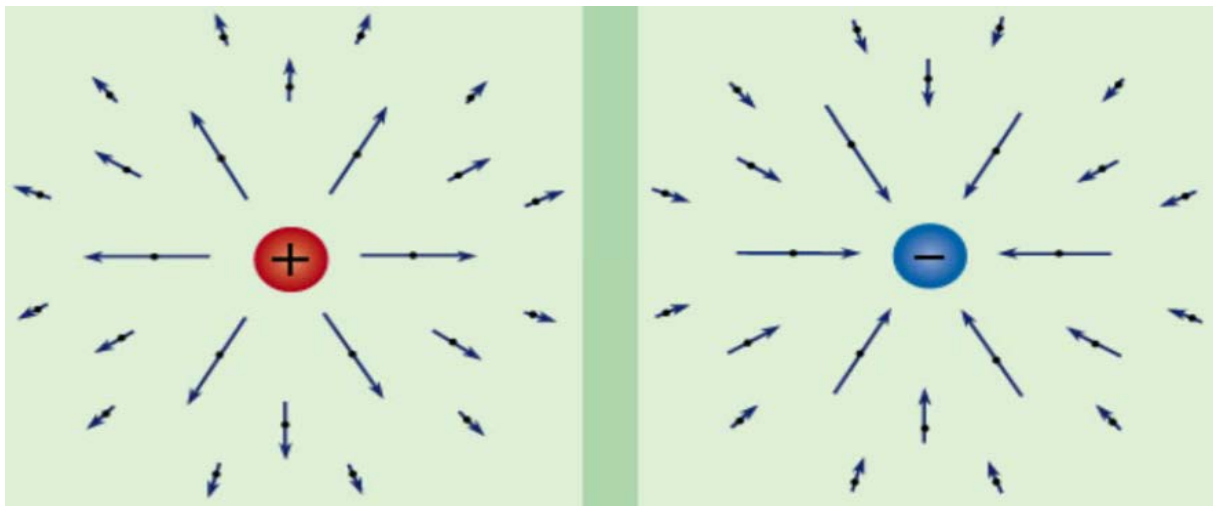
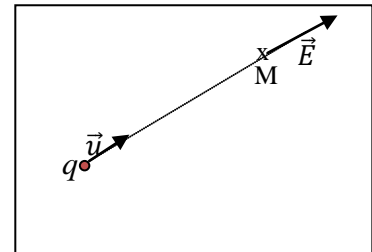
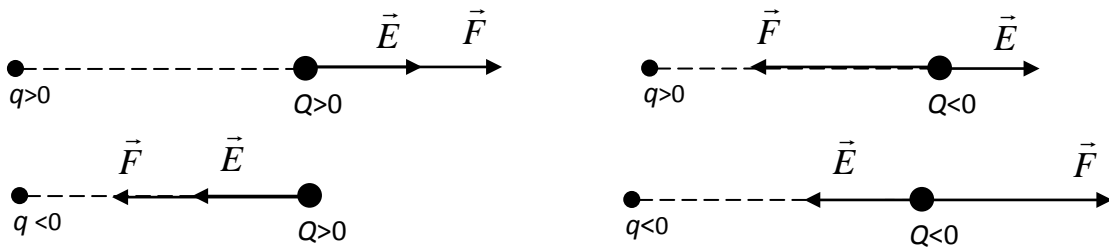


Fig.1 : Le champ autour des charges positive et négative.

Si on place une charge Q dans un champ électrique \vec{E} créé par q . Elle sera soumise à une

$$\text{force } \vec{F} = k \frac{qQ}{r^2} \vec{u} = Q \frac{kq}{r^2} \vec{u} = Q\vec{E}.$$



Le champ est dans le sens opposé à la charge si Q est une charge positive.

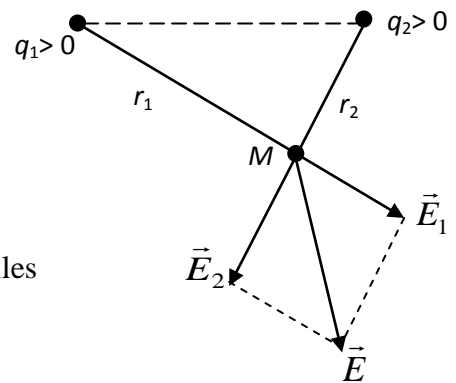
Le champ est vers la charge si Q est une charge négative. Le sens de \vec{E} ne dépend pas de Q mais du signe de q .

- **Champ crée par deux charges ponctuelles**

Soient deux charges ponctuelles q_1 et q_2 , chacune d'elles crée un champ électrique en un point M de l'espace :

$$\vec{E}_1 = k \frac{q_1}{r_1^2} \vec{u}_1 \quad \text{et} \quad \vec{E}_2 = k \frac{q_2}{r_2^2} \vec{u}_2.$$

Le champ électrostatique crée par ces deux charges ponctuelles au point M est égal à la somme des champs $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, que crée séparément chacune des charges q_i prise isolément.



- **Théorème de superposition des champs électriques**

Le champ électrostatique crée par un ensemble de charges ponctuelles $q_1, q_2, q_3, \dots, q_i, \dots, q_n$ en un point M est égal à la somme des champs que crée séparément chacune des charges q_i

prise isolément.
$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{E}_i = \sum_{i=1}^{i=n} k \frac{q_i}{r_i^2} \vec{u}_i.$$

- **Le champ électrique dû à une distribution de charges**

Dès que le nombre de charges augmente, la relation précédente ne permet plus de calculer le champ électrique, les calculs deviennent trop complexes. Dans beaucoup de cas on pourra faire l'approximation que la charge électrique est répartie de manière continue dans l'espace et remplacée la somme par une intégrale.

Soit une portion infiniment petite, représenté par P , d'un conducteur et dq la charge élémentaire qu'elle contient.

Cette charge élémentaire crée un champ électrique en un point M :

$$d\vec{E}_M = k \frac{dq}{r^2} \vec{u}$$

Le champ et le potentiel électriques créés en un point M par cette distribution sont :

$$\vec{E}_M = \int_{\text{distribution}} d\vec{E}_M = \int_{\text{distribution}} k \frac{dq}{r^2} \vec{u} ;$$

La distribution de charge dépend de la géométrie :

Distribution de charge volumique :

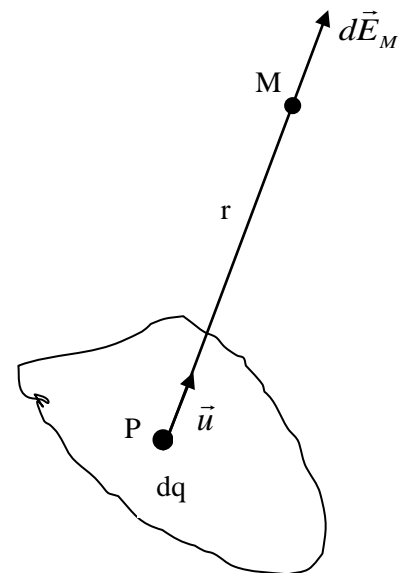
$$\rho = \frac{dq}{dV} \quad \text{et} \quad \vec{E}_M = \iiint_{\text{volume}} d\vec{E}_M = \iiint_{\text{volume}} k \frac{dq}{r^2} \vec{u} = \iiint_{\text{volume}} k \frac{\rho dV}{r^2} \vec{u}$$

Distribution de charge surfacique :

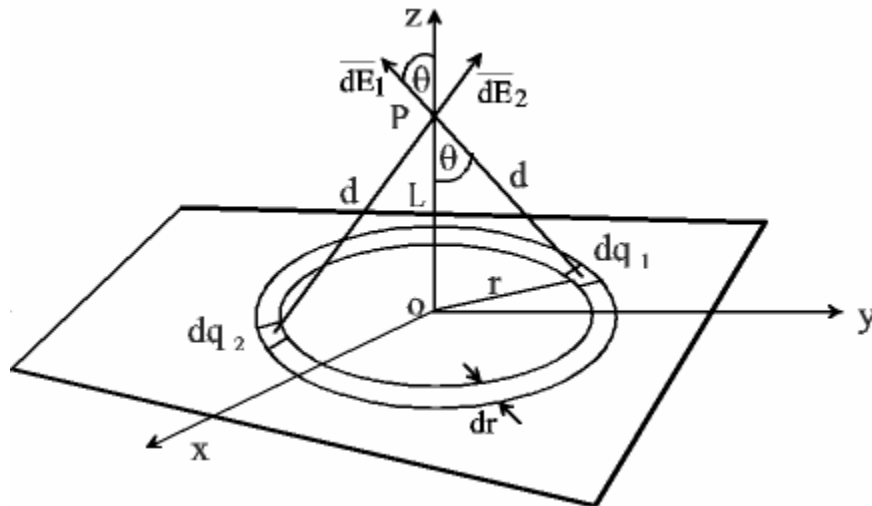
$$\sigma = \frac{dq}{dS} \quad \text{et} \quad \vec{E}_M = \iint_{\text{surface}} d\vec{E}_M = \iint_{\text{surface}} k \frac{dq}{r^2} \vec{u} = \iint_{\text{surface}} k \frac{\sigma dS}{r^2} \vec{u}$$

Distribution de charge linéique :

$$\lambda = \frac{dq}{dl} \quad \text{et} \quad \vec{E}_M = \int_{\text{longueur}} d\vec{E}_M = \int_{\text{longueur}} k \frac{dq}{r^2} \vec{u} = \int_{\text{longueur}} k \frac{\lambda dl}{r^2} \vec{u}$$



Exemple : Calcul du champ électrique dû à un plan infini uniformément chargé



Considérons l'anneau de rayon intérieur r , d'épaisseur infinitésimale dr , centré sur O . L'aire de cet anneau vaut $2\pi r dr$. Divisons maintenant l'anneau en petits segments de longueur infinitésimale contenant une charge dq et remarquons que le champ en P dû à n'importe laquelle de ces charges dq est le même en module : $dE_1 = dE_2$. En effet, toutes ces charges dq sont à la même distance d de P . Par

contre leur direction n'est pas la même. Toutefois, leurs projections dans le plan Oxy s'annulent deux à deux pour deux charges dq_1 et dq_2 diamétralement opposées.

Par conséquent, le champ électrique $d\vec{E}$ dû à l'anneau de rayon r est dirigé suivant l'axe Oz et :

$$\vec{E}_M = \iint_{\text{surface}} d\vec{E}_M = \iint_{\text{surface}} k \frac{dq}{d^2} \vec{u} = \iint_{\text{surface}} k \frac{\sigma dS}{d^2} \vec{u} = \iint_{\text{surface}} \frac{2\pi\sigma r dr}{4\pi\epsilon_0 d^2} \cos\theta \vec{u}_z$$

$$\cos\theta = \frac{L}{d} \quad d = \sqrt{L^2 + r^2}$$

$$E = \int_0^\infty \frac{\sigma L}{2\epsilon_0} \cdot \frac{r dr}{(L^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{\sigma L}{2\epsilon_0} \int_0^\infty \frac{r dr}{(L^2 + r^2)^{3/2}}$$

$$\text{avec} \quad \int_0^\infty \frac{x dx}{(x^2 + L^2)^{3/2}} = \left[\frac{-1}{(x^2 + L^2)^{1/2}} \right]_{x=0}^{x=\infty} = \frac{1}{L}$$

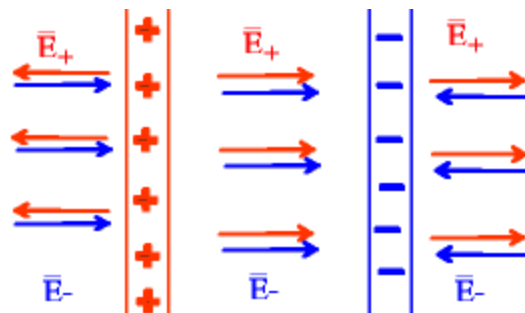
$$\text{d'où} \quad \vec{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \vec{u}_z$$

Remarquons qu'il ne dépend pas de L ce qui veut dire que le champ électrique est uniforme au voisinage d'un plan infini, uniformément chargé : en tout point il lui est perpendiculaire et a une intensité $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$

- champ électrique crée par deux plans parallèles de charges opposées

Le champ électrique dû au plan chargé positivement vaut $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ et se dirige du plan vers

l'extérieur. Celui dû au plan chargé négativement vaut aussi $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ mais se dirige vers le plan.



La figure illustre la superposition des champs E_+ et E_- dus au plan chargé positivement

et au plan chargé négativement. On constate qu'à l'extérieur des deux plans, à gauche et à droite de la figure, les deux vecteurs sont de sens opposés et de même intensité de ce fait ils s'annulent. Entre les deux plaques, les deux vecteurs ont le même sens et s'ajoutent pour donner un champ électrique : $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$

b) Le potentiel électrique

Un potentiel électrique est l'une des grandeurs décrivant l'état électrique d'une région dans l'espace. Si on introduit une charge électrique dans cette région, elle sera soumise à une énergie potentielle électrostatique. Il est caractérisé par un scalaire :

$$V = k \frac{q}{r} + cste . \text{ Son unité est le volt.}$$

On choisit en général la valeur de la constante de telle sorte que le potentiel soit nul lorsque le point M est infiniment éloigné de la charge : $V(r \rightarrow \infty) = 0$. Dans ce cas, le potentiel s'écrit :

$$V_1 = k \frac{q_1}{r_1} \quad \text{et} \quad V_2 = k \frac{q_2}{r_2}$$

Le potentiel est toujours donné à un point d'origine appelé le zéro du potentiel.

Dans le cas de deux charges, chacune de ces deux charges crée un potentiel V_1 et V_2 dans cet espace donné par :

$$V = V_1 + V_2$$

En considérant le théorème de superpositions des particules, le potentiel total de n charges ponctuelles s'écrit :

$$V = \sum_{i=1}^{i=n} V_i = \sum_{i=1}^{i=n} k \frac{q_i}{r_i}$$

c- Lignes de champ

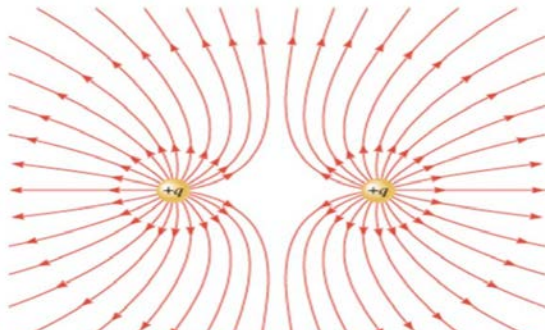
Le champ électrique est représenté avec une multitude de vecteurs. On peut aussi représenter le champ par des lignes de champ. On trace ces lignes de telle sorte que le champ électrique soit toujours tangent aux lignes. On indique aussi, par une flèche sur la ligne, le sens vers lequel pointent les vecteurs.

-Propriétés des lignes de champ

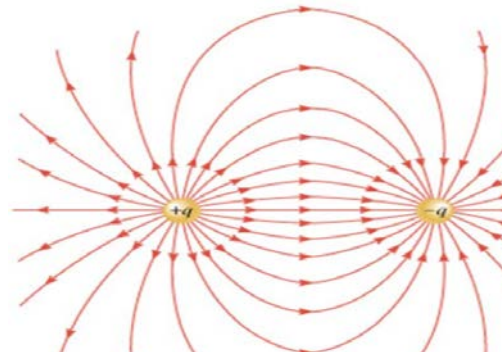
- 1) Le champ est toujours tangent à la ligne de champ, dans la direction de la ligne.
- 2) Plus les lignes de champs s'approchent les unes des autres, plus le champ est intense.
- 3) Le nombre de lignes qui arrivent ou qui partent d'une charge est proportionnel à la charge.

4) Les lignes de champ ne se croisent pas

- Exemples de lignes de champ :



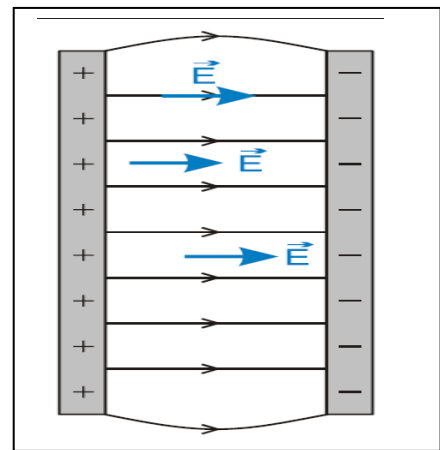
Lignes de champs de deux charges identiques.



Lignes de champs d'un dipôle ($q = -q'$).

- Champ créé par un condensateur chargé

Considérant deux plaques parallèles rapprochées chargées l'une positivement et l'autre négativement, avec des charges de même valeur absolue. A l'exception des régions aux bords, les lignes de champ sont parallèles et perpendiculaires aux plaques. Le champ est *uniforme* entre les deux plaques. Au bord du condensateur les lignes de champ sont courbées vers l'extérieur. Ce phénomène est dit : « effet de bord ».



- Champ autour d'une pointe

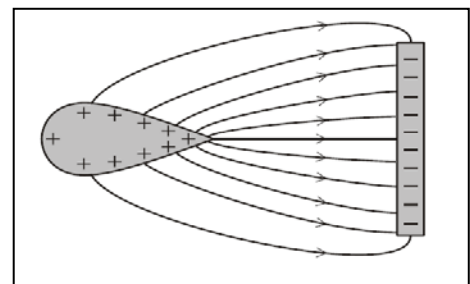
Au voisinage d'une pointe, le champ est particulièrement intense.

Le fait que les lignes de champ se resserrent au niveau de la pointe est appelé « effet de pointe ».

C'est aussi à cet endroit que passe le courant le plus important (S'il y a conduction de courant).

Applications pratiques de l'effet de pointe :

- paratonnerres (ou parafoudres) ;
- électrocoagulation (technique d'opération qui consiste à employer l'énergie électrique pour couper les tissus et pour coaguler les vaisseaux sanguins).



- Remarque

- Le long d'une ligne de champ $dV = -\vec{E} \cdot d\vec{l} < 0$ le potentiel électrique décroît.

- Les lignes de champ sont perpendiculaires aux surfaces équipotentielles : sur une surface équipotentielle $V = cste \Rightarrow dV = -\vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$ d'où $\vec{E} \perp d\vec{l}$.

II.1.4. Énergie potentielle et énergie interne

a) Énergie potentielle

L'énergie potentielle d'une charge ponctuelle placée dans un champ électrique est égal au travail des forces électrostatiques appliqué à cette charge pour la déplacer du point où elle est située (potentiel V) à un point où elle n'est plus soumise à l'action du champ ($V = 0$: infini, ou la terre). C'est aussi le travail que devait fournir un opérateur pour déplacer la charge de l'endroit où $V = 0$ jusqu'à l'endroit où elle se trouve ($V \neq 0$) sans variation de l'énergie cinétique.

$$dE_p = -dW = -\int_0^M \vec{f} \cdot d\vec{l} = -\int_0^M q\vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_0^V qdV ; \quad E_p = qV .$$

b) Énergie interne d'un système de deux charges ponctuelles

Pour assembler deux (2) charges positives, initialement sans interaction l'une par rapport à l'autre, il faut fournir un travail (lutter contre les forces de répulsion). Ce travail est égale à l'énergie potentielle de la charge 2 dans le champ de la charge 1 (ou l'énergie potentielle de la charge 1 dans le champ de la charge 2), on l'appelle énergie interne du système $U = \frac{kq_1q_2}{a}$, cette énergie est positive, elle peut être libérée lorsque les charges s'éloignent indéfiniment l'une de l'autre. Dans le cas où les deux charges sont de signe opposé, le travail qu'il faut fournir pour les assembler est négatif donc l'énergie interne est négative.

c) Énergie interne d'un système de trois charges ponctuelles

Le travail nécessaire à l'assemblage des trois (3) charges ou l'énergie interne du système est $U = \frac{kq_1q_2}{r_{12}} + \frac{kq_1q_3}{r_{13}} + \frac{kq_2q_3}{r_{23}}$.

d) Généralisation : pour un système composé de N charges ponctuelles :

$$U = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{kq_i q_j}{r_{ij}} .$$

- Relations entre le champ électrique et le potentiel

Le travail d'une force électrostatique est donnée par :

$$dw = \vec{F} \cdot d\vec{l} = q \cdot \vec{E} \cdot d\vec{l} = -dE_p = -qdV$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial z} dz = \overrightarrow{\text{grad}}V \cdot \overrightarrow{dl} = -\vec{E} \cdot \overrightarrow{dl}$$

$$\text{d'où : } \vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}V \text{ avec } \overrightarrow{\text{grad}} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i}, \frac{\partial}{\partial y} \vec{j}, \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right)$$

- Relations entre la force électrique et l'énergie potentielle

$$dw = \vec{F} \cdot \overrightarrow{dl} = -dE_p$$

$$dE_p = \frac{\partial E_p}{\partial x} dx + \frac{\partial E_p}{\partial y} dy + \frac{\partial E_p}{\partial z} dz = \overrightarrow{\text{grad}}E_p \cdot \overrightarrow{dl} = -\vec{F} \cdot \overrightarrow{dl}$$

$$\text{d'où : } \vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}}E_p$$

II.1.5. Dipôle électrique

- Un dipôle est un doublet rigide constitué de deux charges égales et opposées (+q, -q) distantes de d très petite devant la distance r à laquelle on étudie l'action de ce dipôle.

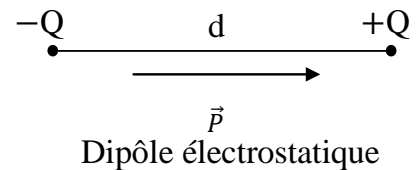
- Le moment électrique (moment dipolaire) est défini par le vecteur

$$\vec{p} = Q \cdot \vec{d} \text{ avec } \vec{d} \text{ est le vecteur déplacement de la charge négative vers la charge positive.}$$

Son unités dans le S.I est le Coulomb x Mètre (C.m).

Dans les anciens systèmes d'unités électriques,

p est exprimé en Debye notée D, ($1D = \frac{1}{3}10^{-29} \text{ C.m}$).



La notion de dipôle électrique est fondamentale pour expliquer des propriétés de la matière. Il joue un rôle particulièrement en chimie où il explique le comportement de certaines molécules qui ont des dipôles permanents ; exemples :

HCl : P = 3.4.10⁻³⁰ Cm (de Cl vers H). CO : P = 0.4.10⁻³⁰ Cm (de O vers C).

H₂O : P = 6.2.10⁻³⁰ Cm (de O vers le milieu des 2 H).

Il intervient aussi dans l'interprétation des propriétés des milieux isolants (diélectriques).

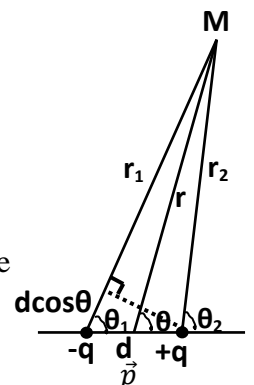
b) Calcul du champ et du potentiel électrostatiques créés par un dipôle à grande distance

Le potentiel électrostatique créé par les deux charges -q et +q en un point M distant de r₁ et r₂ des deux charges s'exprime par :

$$V = V_{+q} + V_{-q} = kq \frac{1}{r_2} - kq \frac{1}{r_1} = kq \frac{r_1 - r_2}{r_1 \cdot r_2}$$

Dans le cas où $r \gg d$: $\Rightarrow r_1 - r_2 = d \times \cos\theta$ et $r_1 \cdot r_2 = r^2$, le potentiel V s'exprime

$$\text{par : } V = kq \frac{d \cos \theta}{r^2} = k \frac{p \cos \theta}{r^2}$$



En appliquant la circulation du champ \vec{E} , nous pouvons déduire les composantes radiale et transversale de \vec{E} à partir du potentiel électrostatique exprimé en fonction des coordonnées polaires r et θ .

Le champ électrique est déduit du potentiel en utilisant : $\vec{E} = -\overrightarrow{Grad}V$.

$$\vec{E} = \begin{cases} E_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{2kp \cos \theta}{r^3} \\ E_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = \frac{kp \sin \theta}{r^3} \end{cases}$$

Le champ électrique s'écrit alors : $\vec{E} = E_r \vec{u}_r + E_\theta \vec{u}_\theta$.

Cas particuliers, positions de Gauss :

$$\theta = 0 ; E_\theta = 0 \text{ et } E_r = \frac{2kp}{r^3}.$$

$$\theta = \pi ; E_\theta = 0 \text{ et } E_r = -\frac{2kp}{r^3}.$$

$$\theta = \pi/2 ; E_r = 0 \text{ et } E_\theta = \frac{kp}{r^3}.$$

$$\theta = -\pi/2 ; E_r = 0 \text{ et } E_\theta = -\frac{kp}{r^3}.$$

c) Dipôle placé dans un champ électrique

Soit un dipôle placé en un point O et baignant dans un champ externe uniforme \vec{E} produit par une distribution quelconque de charges. Chacune des deux charges du dipôle sera soumise à l'action d'une force, \vec{F}_{-q} et \vec{F}_{+q} telle que :

$$\vec{F}_{-q} = -q\vec{E} \text{ et } \vec{F}_{+q} = +q\vec{E} . \text{ Ces deux forces tendent à aligner}$$

le dipôle suivant la direction de \vec{E} .

Les deux forces égales et opposées constituent un couple

$$\text{de force de moment } \vec{M} = \vec{l} \times \vec{F}.$$

Son module $M = d q \sin \varphi$. L'action de ce champ cesse quand

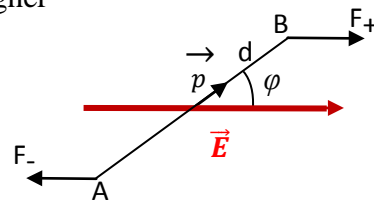
$$M = 0 \text{ pour } \sin \varphi = 0 \text{ donc pour } \varphi = k\pi.$$

Ce résultat peut être retrouvé à partir de l'énergie potentielle du dipôle placé dans un champ constant \vec{E} . Si V_A et V_B définissent le potentiel électriques aux deux extrémités du dipôle, l'énergie potentielle est exprimée par la relation : $E_p = -qV_A + qV_B = q(V_B - V_A)$.

La différence de potentielle ($V_A - V_B$) peut être exprimée à partir du champ \vec{E} en considérant le dipôle comme un système microscopique :

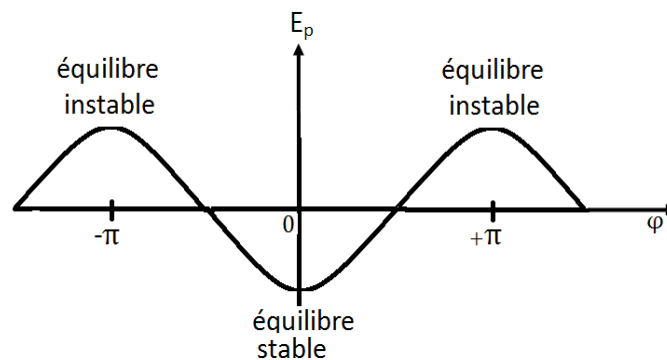
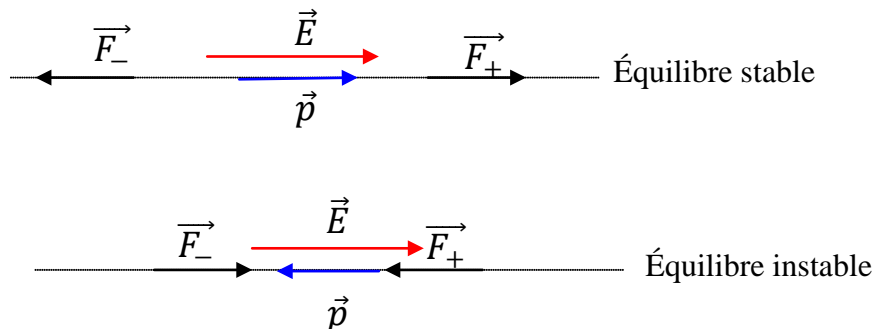
$$V_B - V_A = -\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = -\vec{E} \cdot \vec{d} \Rightarrow E_p = -q E \cdot \cos \varphi.$$

$$E_p = -q E \cdot \cos(\varphi)$$



$E_p = -q E$ est minimale pour $\varphi = 0$ (équilibre stable) et

$E_p = q E$ pour $\varphi = \pi$ (équilibre instable).



Représentation de la courbe de l'énergie potentielle en fonction de φ

II.1.6. Conducteurs

Un conducteur est un milieu qui contient des électrons libres qui se déplacent dans tout le milieu. Il s'agit d'électrons dits de conduction, qui sont très faiblement liés à leurs noyau ; souvent les électrons des couches d dans les métaux de transition.

a) Conducteurs en équilibre électrostatique

Le champ est nul dans un conducteur à l'équilibre (sinon on aurait mouvement des charges libres, et donc pas d'équilibre, ...) : $\vec{F} = q\vec{F}_{int} \Rightarrow \vec{E}_{int} = \vec{0}$.

- Potentiel électrique à l'intérieur d'un conducteur en équilibre électrostatique

Soient deux point M et M' à l'intérieur d'un conducteur en équilibre électrostatique.

Le potentiel $dV = -\vec{E} \cdot \overrightarrow{MM'} = 0$ (du fait que $\vec{E} = \vec{0}$ à l'intérieur du conducteur).

$\Rightarrow V(M) = V(M') = Cste$ (Le conducteur constitue un volume équipotentiel, et son contour est une surface équipotentielle).

L'expression du champ E au voisinage extérieur immédiat d'un conducteur s'écrit : $\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$.

σ est la densité surfacique de charges ; ce résultat peut être retrouvé en utilisant le théorème de Gauss.

- Le pouvoir des pointes

Les charges ont tendance à s'accumuler sur les pointes (zones à faibles rayons).

Exemple

Pour deux sphères, respectivement, de rayon R_1 et R_2 et de charges Q_1 et Q_2 de densité surfacique σ_1 et σ_2 , lorsque celles-ci sont reliées et à l'équilibre. On peut donc considérer que chaque sphère est isolée mais qu'elle partage le même potentiel V . Cela implique alors

$$\begin{aligned}V_1 = V_2 &\Leftrightarrow \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint \frac{\sigma_1 ds}{R_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint \frac{\sigma_2 ds}{R_2} \\ &\Leftrightarrow \sigma_1 R_1 = \sigma_2 R_2 \\ &\Leftrightarrow \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{R_2}{R_1}\end{aligned}$$

Donc, plus l'une des sphères aura un rayon petit et plus sa densité de charges sera élevée.

- Capacité propre d'un conducteur

La capacité électrostatique est l'aptitude qu'a un conducteur à emmagasiner « absorber » des charges électriques qu'il reçoit.

La capacité électrostatique d'un conducteur à l'équilibre est définie par : $Q = C \times V$.

C : dépend de la forme du conducteur.

- Énergie interne d'un conducteur

L'énergie interne d'un conducteur du conducteur isolé portant une charge Q est simplement l'énergie d'interaction de la distribution de charge qu'il porte en surface.

Il s'agit donc de

$$E = \frac{1}{2} \iint \sigma V ds = \frac{1}{2} V \iint \sigma ds = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V.$$

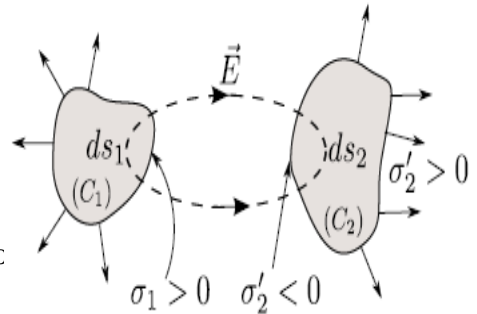
$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V.$$

- Influence de deux conducteurs chargés

L'influence des charges électriques d'un corps se manifeste quand ce dernier est placé dans un champ électrique.

Influence partielle

Soient deux conducteurs (C_1) avec une charge initiale $\sigma_1 > 0$ et (C_2) est neutre. Dès que l'on approche (C_1) de (C_2), il apparaît sur la surface de (C_2) une densité de charge $\sigma'_2 < 0$ sur la partie faisant face à (C_1) et une densité $\sigma'_2 > 0$ sur la partie opposée de (C_2). Les densités sont de signes opposés pour assurer la neutralité de (C_2). Le champ électrique à la surface :



$$\iint E ds = 0 = \sum \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$$

$$\sigma_1 ds + \sigma'_2 ds = 0$$

$$Q_1 = -Q_2$$

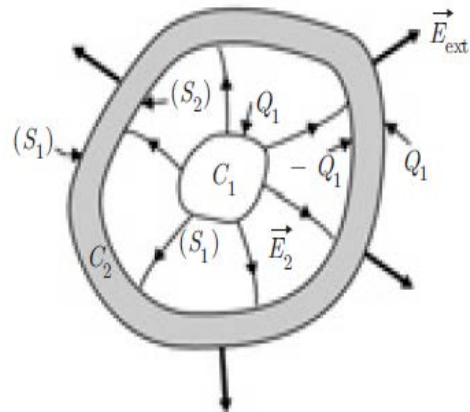
Influence de deux conducteurs chargés : Les charges Q_1 de (C_1) et Q_2 de (C_2) qui se font face sur deux éléments de surface correspondants sont égales et opposées. Ceci constitue le théorème de Faraday.

L'influence est dite partielle car seule une partie des lignes de champ issues de (C_1) aboutit à (C_2).

Influence totale

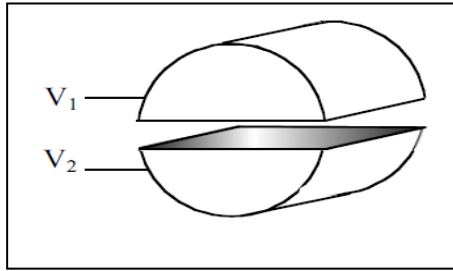
Si l'un des deux conducteurs entoure totalement l'autre, il y a correspondance totale entre les charges de la surface de (C_1) et celles sur de (C_2). On parle d'influence totale.

L'influence totale constitue le principe physique de base d'un condensateur.

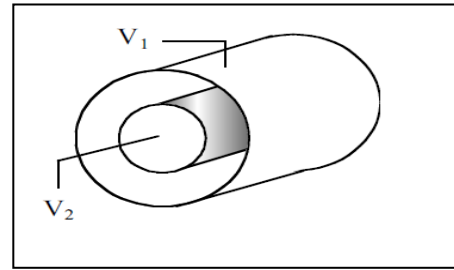


b) Condensateurs

On appelle condensateur tout système de deux conducteurs en influence électrostatique. Il y a deux sortes de condensateurs : condensateur à armatures rapprochées et condensateurs à influence totale.



Armatures rapprochées



Influence totale

En général, les deux armatures sont séparées par un matériau isolant (un diélectrique).

Soit deux conducteurs A et B séparés par un milieu isolant.

Le système $[AB]$ forme un condensateur, représenté schématiquement par : $\text{—}|\text{—}$

- Capacité d'un condensateur

Quand on relie un condensateur à un générateur de tension, la tension V mesuré entre ces deux armatures est proportionnelle à la quantité d'électricité emmagasinée Q . On a :

$$Q = C.V$$

Le coefficient de proportionnalité noté C est appelé capacité du condensateur son unité est le Farad (F).

- L'énergie interne d'un condensateur

L'énergie interne d'un condensateur s'écrit :

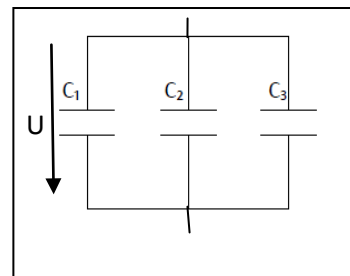
$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V, \text{ avec } V = V_A - V_B.$$

- Association de condensateurs :

i) Condensateurs en parallèle

Soit

- Q_1 la charge du condensateur C_1
- Q_2 la charge du condensateur C_2
- Q_3 la charge du condensateur C_3



La charge totale Q du groupement vaut

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_1 U, \quad Q_2 = C_2 U \quad \text{et} \quad Q_3 = C_3 U \\ Q &= Q_1 + Q_2 + Q_3 = C_1 U + C_2 U + C_3 U \\ Q &= (C_1 + C_2 + C_3) U = C_{\text{eq}} U \\ C_{\text{eq}} &= C_1 + C_2 + C_3 \end{aligned}$$

Pour N condensateurs en parallèle :

$$C_{eq} = \sum_{i=1}^{i=N} C_i$$

ii) Condensateurs en série

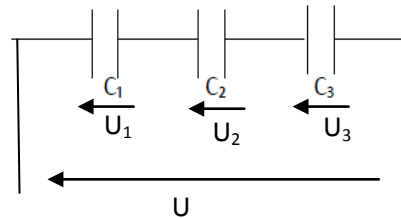
Soit

Q_1 la charge du condensateur C_1

Q_2 la charge du condensateur C_2

Q_3 la charge du condensateur C_3

La charge totale Q



$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$ et $U = U_1 + U_2 + U_3$

$$\frac{Q}{C_{eq}} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

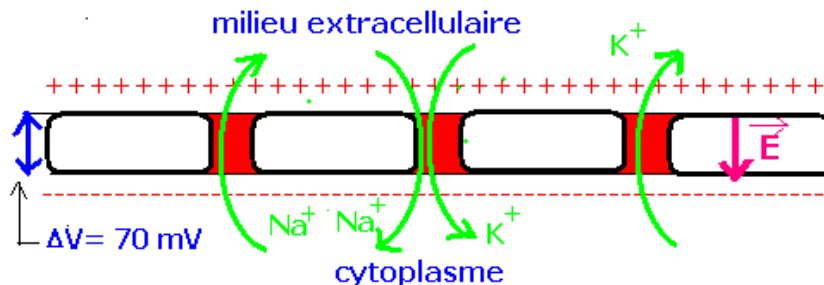
$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Pour N condensateurs en série

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{1}{C_i}$$

- Condensateurs et potentiels membranaires

Dans la membrane d'une cellule (par exemple un neurone) il y a une différence de potentiel $\Delta v = 70\text{mV}$ (au repos) à cause d'une différence de flux des ions K^+ et Na^+ transmembranaires.



Il y a une accumulation nette de charges des 2 côtés de la membrane (environ 5 millions d'ions pour une cellule de $20 \mu\text{m}$ de diamètre). L'ensemble forme alors un condensateur.

La charge totale Q portée par la membrane est : $Q = 5 \cdot 10^6 \times 1.6 \cdot 10^{-19} = 8 \cdot 10^{-13}\text{C}$

La capacité C (si on suppose que les faces sont quasi-parallèles) est :

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = 1.1 \times 10^{-11} F = 11 pF$$

L'épaisseur de la membrane est de l'ordre de $e = 70 \text{ nm}$, le champ électrostatique

dans la membrane est : $E = \frac{\Delta V}{e} = 10^6 V/m$

II.2. Électrocinétique

L'électrocinétique est l'étude du déplacement de charges (libres) dans un milieu conducteur où il existe une différence de potentiel entre deux points de celui-ci.

II.2.1. Courant électrique

Le Courant électrique est le mouvement d'un ensemble de particules chargées dans un conducteur en déséquilibre électrostatique, pour maintenir ce déplacement, on doit utiliser un appareil appelé générateur qui ramena ces charges vers leurs points de départ.

a) L'intensité du courant électrique

L'intensité I du courant électrique à travers une section donnée S est égale au rapport de la quantité d'électricité dq (charge algébrique) qui traverse cette section sur le temps dt de cette traversée, on écrit alors :

$I = dq/dt$ (en Ampère, noté A). I dépend en général du temps t .

Un courant électrique est *continu ou en régime stationnaire* si son intensité I reste constante au cours du temps.

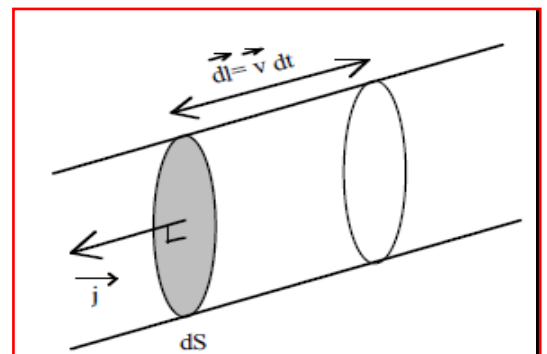
b) Densité de courant électrique

Considérons un fil conducteur de section S , dans lequel se trouvent n porteurs de charge q , animés d'une vitesse \vec{v} . Pendant un instant dt , ces charges parcourent une distance $\vec{x} = \vec{v} dt$.

Si dS , est un élément infinitésimal de surface mesuré sur la section du fil ayant n charges mobiles par unité de volume (porteurs de charge q), la quantité de charge électrique qui traverse cette surface, pendant un instant dt , est dQ , telle que :

$$dQ = n \cdot q \cdot dV = n \cdot q \cdot d\vec{x} \cdot d\vec{S} = n \cdot q \cdot \vec{v} \cdot dt \cdot d\vec{S}.$$

On appelle $\vec{j} = n \cdot q \cdot \vec{v}$ vecteur densité de courant.



c) Sens conventionnel du courant

Le sens conventionnel du courant, choisi arbitrairement par Ampère au début du dix-neuvième siècle, est opposé à celui des électrons. Par conséquent, le courant électrique circule du pôle positif au pôle négatif à l'extérieur du générateur et du pôle négatif au pôle positif à l'intérieur du générateur.

II.2.2. La résistance électrique (grandeur physique)

Si on fait passer un courant électrique I dans un fil conducteur, l'expérience a montré que ce conducteur s'oppose et résiste au passage de ces charges. Ceci s'explique par l'augmentation de la température de ce conducteur. L'expérience, montre que cette résistance, noté R , peut s'exprimer entre deux point A et B sous la forme : $V_A - V_B = RI$ avec $R = \text{cste}$.

La constante R est appelée la résistance du fil électrique.

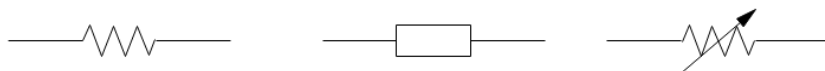
- Loi d'Ohm

La résistance R d'un conducteur est donnée par : $R = V/I$, (son unité est Ohm, symbole Ω).

La relation est dite loi d'Ohm.

II.2.3. La résistance électrique (dispositif électrique)

Dans les circuits électriques, il faut parfois limiter l'intensité du courant afin d'éviter l'endommagement de certains composants électriques. On utilise à ces fins des résistances techniques. Elles sont des composants électriques (électroniques) dont la résistance a une valeur bien déterminée. Elles sont symbolisées par :



b) Association de résistances

i) Association en série

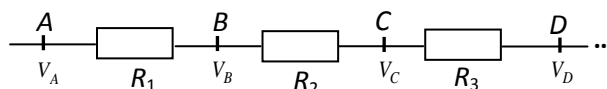
Soit trois résistances reliées en série

Les ddp s'expriment comme suit :

$$V_A - V_B = R_1 \times I$$

$$V_B - V_C = R_2 \times I$$

$$V_C - V_D = R_3 \times I$$



La somme des ddp :

$$(V_A - V_B) + (V_B - V_C) + (V_C - V_D) = V_A - V_D = (R_1 + R_2 + R_3) \times I .$$

On peut remplacer les résistances montées en série par une résistance équivalente $R_{\text{éq}} = \sum_{i=1}^n R_i$.

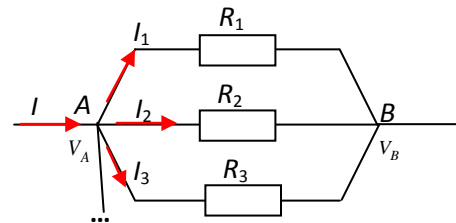
ii) Association en parallèle

Les ddp et les courants des branches s'expriment comme suit :

$$V_A - V_B = R_1 \times I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{V_A - V_B}{R_1}$$

$$V_A - V_B = R_2 \times I_2 \Rightarrow I_2 = \frac{V_A - V_B}{R_2}$$

$$V_A - V_B = R_3 \times I_3 \Rightarrow I_3 = \frac{V_A - V_B}{R_3}$$



La somme des courants :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = (V_A - V_B) \left(\frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \right)$$

On peut remplacer les résistances montées en parallèle par une résistance équivalente $R_{\text{éq}}$

$$\frac{1}{R_{\text{éq}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} .$$

c) Loi de joule

Lorsqu'un courant électrique traverse une résistance, il y a une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Cela est dû à l'énergie perdue par les électrons quand ils traversent le conducteur (Effet Joule), sachant que ce dernier résiste au mouvement des électrons.

La puissance électrique P dans une résistance est définie comme l'énergie par unité de temps nécessaire pour maintenir le courant en circulation, elle vaut : $P = I \cdot \Delta V$.

P : la puissance électrique ; I : le courant traversant le conducteur ; ΔV : la différence de potentiel entre les deux extrémités du conducteur.

On a aussi : $\Delta V = R \cdot I$. d'où $P = R \cdot I^2$.

Cette dernière équation est appelée la loi de Joule.

Si l'élément transforme toute l'énergie consommée en chaleur par effet joule, alors la chaleur

$$Q = R \times I^2 \times t ; t \text{ est le temps de passage du courant.}$$

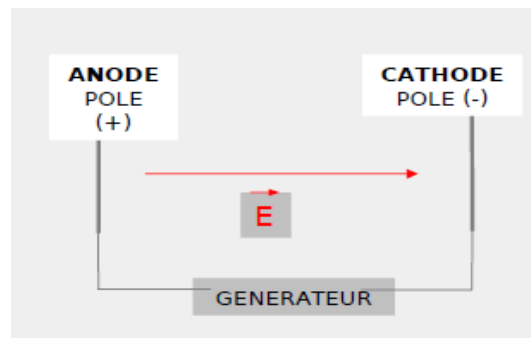
Pour mieux exporter l'électricité sans perte ; on doit utiliser des fils à résistances faibles.

II.3. Électrophorèse

L'électrophorèse est une méthode de séparation des constituants en solution électrolyte basé sur la différence de migration de particules chargées électriquement sous l'action d'un courant électrique. Les constituants à séparer peuvent être des ions métalliques, des molécules ou des macromolécules (protéines).

II.3.1. Le principe de l'électrophorèse

La séparation d'espèces chargées contenues dans un électrolyte se fait par migration des espèces due à un champ électrique. Le champ électrique est créé par deux électrodes reliées à un générateur de tension continue.



Les ions sont attirés par l'électrode de signe de potentiel opposé à leur charge. Les cations sont attirés par la cathode (pôle -), les anions par l'anode (pôle +) et les substances neutres ne subissent pas l'action du champ électrique. Les espèces ne se déplacent pas à la même vitesse ce qui permet la séparation des espèces.

II.3.2. Théorie de l'électrophorèse

Selon les lois de l'électrostatique, la force électrique constante, F_e , sur un ion de charge q dans un champ électrique d'intensité, E , est: $F_e = qE$

- La migration électrophorétique de l'ion à travers la solution est opposée par une force de friction: $F_f = f v$

où v représente la vitesse de migration et $f = 6\pi\eta r$ son coefficient de friction.

- Le coefficient de friction donne une mesure de la résistance exercée par la solution sur l'ion pendant sa migration. Ceci dépend de la taille et de la viscosité η de la solution.

- Dans un champ électrique constant, les forces exercées sur l'ion vont s'équilibrer :

$$qE = f v \quad \text{d'où} \quad v / E = q / f = \mu$$

$$\mu = q / 6\pi\eta r.$$

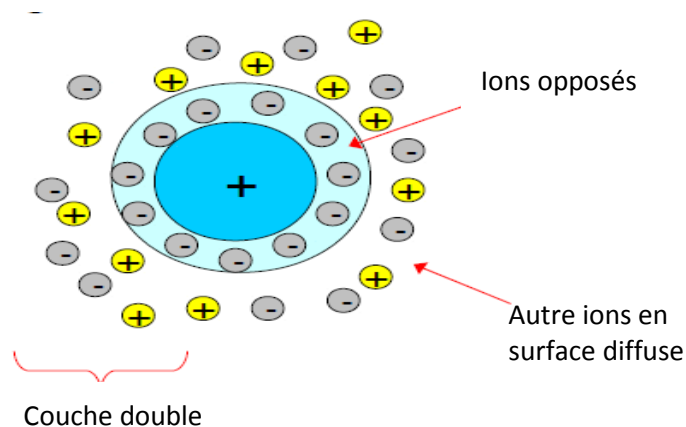
q = charge de l'ion, η = viscosité du milieu, r = rayon de l'ion et μ est appelé mobilité électrophorétique.

La mobilité est proportionnelle à la charge de l'ion et inversement proportionnelle à son rayon r et au coefficient de viscosité du milieu.

Chaque ion se déplace avec une vitesse caractérisée par une mobilité électrophorétique,

Remarque : Une macromolécule organique : possède de nombreux groupements ionisables. Certains seront chargés positivement et d'autres négativement au pH de l'expérience.

La molécule porte une charge propre globale Q . Elle attire en surface les ions de charges opposés qui forment la couche liée (avec le solvant). Cette couche liée perturbe aussi la répartition des autres ions en surface. Ils forment la couche diffusée. L'ensemble forme la couche double.



Dans ce cas c'est l'ensemble des molécules + couche double qui se déplace. On parle de potentiel électrocinétique ζ' qui apparait à la surface de la macromolécule solvatée qui dépend de la structure de la molécule et de l'électrolyte qui la contient par sa composition.

La mobilité électrophorétique vaut alors :

$$\mu = \zeta' \varepsilon / 6\pi\eta , \text{ avec } \varepsilon \text{ est la constante diélectrique du milieu et } \eta \text{ sa viscosité.}$$

- Point isoionique et isoélectrique

Point isoionique et isoélectrique sont les deux cas de pH pour lequel la mobilité électrophorétique est nulle.

Dans l'eau pure → point isoionique : 5,37 pour l'albumine.

Dans un milieu complexe (NaCl 0,15 M) → point isoélectrique : 4,4 pour l'albumine.

II.3.4. les différents types d'électrophorèse

On a deux grands types d'électrophorèse.

a- Électrophorèse de zone

La migration s'effectue sur un support horizontal ou vertical, imprégné d'un électrolyte tampon. Le système est fermé pour éviter l'évaporation. Les deux bornes sont reliées à un générateur de tension continue.

La tension imposée est supérieure à 100 (V) et l'intensité du courant électrique est de quelques (mA). Le support peut être un milieu poreux, bande de papier filtre ou d'acétate de cellulose ou bien un Gel minéral ou organique.

Le dépôt de l'échantillon se fait sous forme d'un trait transversal sur la bandelette à l'intérieur de puits aménagés, lors de la fabrication du gel, ce qui permet d'analyser différentes fractions en même temps.

Suivant le pH et la composition du milieu, les molécules vont acquérir un potentiel électrocinétique. Elles migrent en direction de l'électrode de signe opposé. On applique la tension pendant un temps assez court pour éviter la diffusion dans le milieu poreux. A la fin de la migration, on obtient un électrophorégramme, qui donne les différentes bandes correspondantes aux molécules séparées.

b) Électrophorèse capillaire

La migration électrophorétique s'effectue dans un tube capillaire (15 à 150 micromètres de diamètre et 35 à 100 cm de longueur). La détection des molécules se fait grâce à un système placé sur le trajet : peut être un détecteur UV ou des électrodes. Le tube capillaire a ces deux extrémités dans la solution d'électrolyte. Les potentiels employés sont de l'ordre de 10 à 30 kV. La paroi interne du capillaire se polarise négativement à cause des groupements silanols qui s'ionisent quand le pH est supérieur à 3. Il y aura donc une accumulation de charges positives au contact de cette paroi. Ainsi on observe un déplacement d'ensemble, à vitesse constante, vers la cathode (-) à cause du flux électroosmotique. Dans ce type d'électrophorèse toutes les espèces (chargées ou non) subissent ce mouvement.

Molécule chargée positivement

Le déplacement électrophoretique (en direction de la cathode) et le flux électroosmotique ont la même direction, les deux mouvements s'additionnent et l'espèce est accélérée.

Molécule chargée négativement

Le déplacement électrophoretique (en direction de l'anode) s'oppose au flux électroosmotique, l'espèce est ralentie.

Les molécules neutres

Les molécules neutres se dirigeront vers la cathode à la vitesse du flux.

Introduction de l'échantillon

- Comme les espèces migrent, en général, dans le même sens, on effectue le dépôt au niveau opposé.
- On peut se contenter de quelques nano litres que l'on fait pénétrer dans le capillaire

II.3.5. Applications de l'électrophorèse

L'électrophorèse trouve différentes applications, on peut citer :

- . Analyse de protéines sériques (identification et dosage des protéines du sérum).
- . Détermination des propriétés des molécules comme leur point isoélectrique, leurs masses moléculaire (par comparaison).
- . Séparation et dosage d'espèces organiques ou ioniques (des mobilités avec celles de standards de masses moléculaires connues).

Exercices

Exercice 1

Deux sphères conductrices identiques portent des charges q_1 et q_2 , on les met en contact puis on les sépare. Calculer les charges q'_1 et q'_2 qu'elles prennent dans les cas suivants :

(a) $q_1 = +3 \cdot 10^{-8} \text{C}$, $q_2 = 0$ (b) $q_1 = +3 \cdot 10^{-8} \text{C}$, $q_2 = +8 \cdot 10^{-8} \text{C}$ (c) $q_1 = +3 \cdot 10^{-8} \text{C}$, $q_2 = -8 \cdot 10^{-8} \text{C}$.

- Précisez chaque fois le sens du transfert des électrons.

Exercice 2

Trois charges positives $q_1 = 6 \text{ (}\mu\text{C)}$, $q_2 = 2 \text{ (}\mu\text{C)}$ et $q_3 = 4 \text{ (}\mu\text{C)}$ sont disposées à 20 (cm) l'une de l'autre sur un même axe (voir figure 1).

- 1) Calculer la force appliquée sur la charge q_2 par les deux autres charges ?
- 2) Calculer l'énergie potentielle de chaque charge.
- 3) Définir et calculer l'énergie potentielle interne U du système.

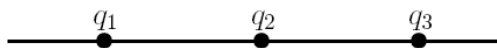


Figure 1

Exercice 3

Entre deux plaques métalliques horizontales distantes de 1,5 (cm), on applique une différence de potentiel de 3 (kV). On constate alors que de petites gouttes d'huile chargées négativement sont en équilibres entre les deux plaques.

- 1) Quelles sont les polarités des plaques ?
- 2) Quelle est la charge d'une goutte d'huile ? Comparer la à la charge d'un électron.

On donne : masse volumique de l'huile : $\rho_h = 900 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, diamètre d'une goutte : $D = 4,1 \text{ (}\mu\text{m)}$. Intensité du champ de la pesanteur : $g = 9,8 \text{ (m/s}^2\text{)}$.

Exercice 4

On peut modéliser la molécule d'eau, par un atome d'oxygène portant la charge -2δ relié à deux atomes d'hydrogène portant chacun la charge $+\delta$. δ vaut 33% de la charge élémentaire ; l'angle entre les deux liaisons O-H est noté α ; la distance entre un atome d'oxygène et un atome d'hydrogène est notée d .

Faire un schéma.

Déterminer l'expression (vectorielle) du moment dipolaire de la molécule d'eau et calculer sa valeur. **Données** : $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$; $d = 0.952 \text{ \AA}$; $\alpha = 104^\circ 45'$.

Exercice 5

Soit un condensateur plan dont les armatures sont perpendiculaires à un axe Ox horizontal. L'armature négative porte la densité de charge $-\sigma$ et coupe l'axe Ox à l'abscisse $x = -a$, l'armature positive porte la charge $+\sigma$ et coupe l'axe Ox à l'abscisse $x = a$.

Le champ électrique au sein d'un condensateur de ce type a pour expression $\vec{E} = -\frac{\sigma}{\epsilon_0} \vec{e}_x$, où ϵ_0 est la permittivité du vide et \vec{e}_x vecteur unitaire le long de l'axe Ox .

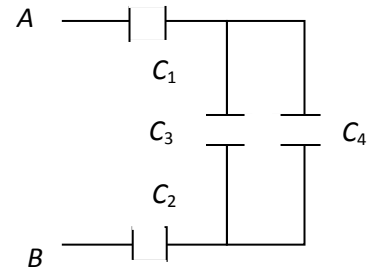
On place un dipôle électrostatique de moment dipolaire \vec{P} au centre de ce condensateur tel que $\vec{P} \cdot \vec{e}_x = p \cdot \cos\alpha$.

1. Donner l'expression de l'énergie potentielle de ce dipôle.
2. Trouver ses positions d'équilibre.
3. Pourquoi ne se déplace-t-il pas dans le condensateur ?

Exercice 6

Quatre condensateurs C_1 , C_2 , C_3 et C_4 sont placés entre deux points A et B (voir la figure). On applique une ddp : $V_A - V_B = U = 200$ (volts), et on donne : $C_1 = C_2 = C_0$ et $C_3 = C_4 = C_0/2$ avec $C_0 = 1(\mu\text{F})$.

- 1- Calculer la capacité du condensateur équivalent à l'assemblage (C_{AB}), puis déterminer sa charge.
- 2- Calculer la ddp aux bornes de chacun des condensateurs
- 3- Déduire la charge de chaque condensateur.
- 4- Donner l'énergie emmagasinée dans l'assemblage de condensateurs.

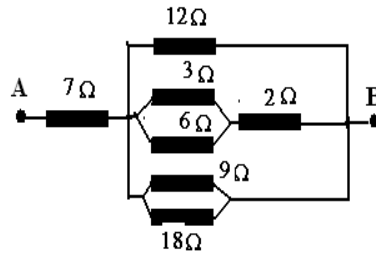


Exercice 7

- 1) Un radiateur électrique a une puissance de 1000 (W) et absorbe un courant de 4,4 (A). Quelle est la résistance de ce radiateur ?
- 2) Un fer à repasser de puissance de 800 (W) absorbe un courant de 3,5A. Calculer sa résistance interne. Il fonctionne pendant 1h 30 (min) quelle énergie thermique aura-t-il dissipée ?

Exercice 8

Déterminer la résistance R_{AB} équivalente de l'ensemble des résistances représentées ci -après, entre les points A et B .



Exercice 9

Un fil cylindrique d'argent de 0.5 mm de rayon est traversé par des charges électriques à raison de 72 C/h. L'argent contient $5.8 \cdot 10^{22}$ électrons par cm^3 . Calculer :

Le module de la densité de courant J et la vitesse moyenne des électrons de conduction.

Exercice 10

L'une des techniques d'étude de l'ADN est l'électrophorèse. En modélisant la cuve à électrophorèse par un condensateur plan de distance entre les deux armatures $d = 12$ cm est connecté à un générateur de tension électrique continue réglé sur 100 V.

- 1) Représenter quelques lignes de champ et le vecteur champ électrique sans tenir compte de l'échelle.
- 2) Pourquoi les molécules doivent être ionisées pour pouvoir migrer.
- 3) Quelle charge doit avoir une molécule pour migrer de l'anode vers la cathode.
- 4) La molécule qui a gagné deux électrons migre-t-elle plus ou moins que celle qui a gagné un électron.
- 5) Calculer la norme de la force électrique pour une molécule ionisée portant une charge $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$.

Chapitre III

Les bases de l'optique

Introduction

L'optique est le domaine de la physique qui étudie la lumière. La connaissance des propriétés de cette dernière a permis de concevoir de nombreux instruments optiques. Certains, comme le télescope ou le microscope ont permis de découvrir des mondes très petits ou très éloignés. D'autres, comme les lunettes ou les lasers chirurgicaux, ont amélioré notre qualité de vie. L'étude de l'optique distingue trois modèles.

- **Modèle géométrique**

L'optique géométrique est une branche de l'optique qui traite la propagation de la lumière modélisée en tant que un ensemble de rayons lumineux avec une propagation rectiligne. Cette approche simple permet notamment des constructions géométriques d'images d'un objet par un système optique d'où dérive son nom.

- **Modèle ondulatoire**

Dans cette approche, la nature de la lumière est prise en compte. La lumière est décrite comme un phénomène vibratoire de nature électromagnétique, c'est à dire un champ électrique et un champ magnétique variant dans le temps et se propageant dans le vide à la vitesse $c = 299792458 \text{ m.s}^{-1} \sim 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

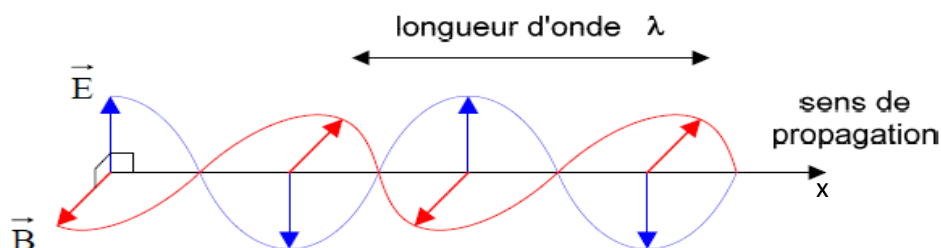
- **Modèle quantique**

La théorie quantique considère la lumière comme des quanta d'énergie qui se propagent. La lumière est étudiée alors sous la forme de corpuscules dit photons.

III.1. Caractere ondulatoire de la lumiere

La théorie ondulatoire (Huygens, Fresnel) considère la lumière comme une superposition d'un champ électrique et un champ magnétique perpendiculaires entre eux, qui forment des ondes électromagnétiques se propageant dans une direction rectiligne. Les ondes électromagnétiques sont donc des ondes transversales.

La figure ci-dessous représente la structure de l'onde à un instant t donné,



III.1.1. Caractéristique des ondes électromagnétiques

Les ondes lumineuses appartiennent à la famille des ondes électromagnétiques, décrites par le champ électrique $\vec{E}(x, t)$ et le champ magnétique $\vec{B}(x, t)$, qui vérifient l'équation d'onde suivante dans un milieu transparent, homogène et isotrope :

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 \vec{E}(x, t)}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 \vec{B}(x, t)}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{B}(x, t)}{\partial t^2} = 0$$

v désigne la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu considéré.

Pour une onde lumineuse monochromatique le champ électrique s'écrit :

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx)$$

k est le module du vecteur d'onde associé à la propagation de l'onde lumineuse, est appelé le nombre d'onde et ω la pulsation.

L'onde a une double périodicité, temporelle $T = \frac{2\pi}{\omega}$ et spatiale $\lambda = \frac{2\pi}{k} = vT$ appelé la longueur d'onde, elle représente la distance parcourue pendant une période T .

On définit la fréquence de l'onde ν le nombre de longueurs d'onde parcourues par unité de temps. Si une onde parcourt une longueur x pendant un temps t : $x = vt \Rightarrow$ le nombre d'ondes n parcouru par le rayon lumineux est $n = x/\lambda$, alors la fréquence ν est donné par :

$$\nu = \frac{n}{t} = \frac{x}{\lambda t} = \frac{vt}{\lambda t} = \frac{\lambda}{T\lambda} = \frac{1}{T} = \frac{2\pi}{\omega}$$

L'unité de ν est le hertz(Hz), avec $1(\text{Hz}) = 1 (\text{s}^{-1})$.

Remarque

La théorie ondulatoire décrit le passage de la lumière à travers divers substances. Elle explique les phénomènes de réfraction, de réflexion, de diffraction et d'interférences, mais elle échoue dans l'interprétation des phénomènes d'absorption et d'émission (effet photoélectrique). On fait alors appel à la théorie quantique en associant à une onde électromagnétique de fréquence ν une particule sans masse appelée photon (corpuscule) d'énergie $E = h\nu$. Avec $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ est dite constante de Planck. ν est la fréquence d'une onde monochromatique.

Les deux modèles, ondulatoire et corpusculaire, ne sont pas contradictoires mais ils se complètent. Cette dualité onde-corpuscule est en fait nécessaire pour interpréter l'ensemble des propriétés de la lumière.

III.1.2. Le spectre électromagnétique

On rencontre différents types d'ondes électromagnétiques, ayant des propriétés très différentes. On peut les trier selon leur fréquence ν , mais dans la pratique on préfère manipuler leur longueur d'onde λ .

Tableau 1.1. Présentation du spectre électromagnétique dans le vide.

Domaine	λ en (m)	ν en (Hz)	Utilité
rayons γ	$10^{-14} \text{ — } 10^{-12}$	$10^{22} \text{ — } 10^{20}$	Énergie nucléaire - Spectrométrie Mössbauer
rayons X	$10^{-12} \text{ — } 10^{-9}$	$10^{20} \text{ — } 10^{17}$	Imagerie médicale – Biopsie guidée aux rayons X -Scanner - la sécurité - Contrôle technique
ultraviolet	$10^{-9} \text{ — } 4.10^{-7}$	$10^{17} \text{ — } 10^{15}$	Bronzage
visible	$4.10^{-7} \text{ — } 8.10^{-7}$	$8.10^{14} \text{ — } 4.10^{14}$	Vision et couleurs
infrarouge	$8.10^{-7} \text{ — } 10^{-3}$	$4.10^{14} \text{ — } 10^{11}$	Thermographie - Détecteur de présence – Laser - Télécommandes - Contrôle d'authenticité
micro-ondes et ondes hertziennes	$10^{-3} \text{ — } 10^4$	$10^{11} \text{ — } 10^4$	Les fours - Les radars Télévision - téléphonie

III.2. La lumière blanche

La lumière blanche est un mélange de toutes les couleurs du spectre du visible : onde polychromatique. Une onde monochromatique a une seule longueur d'onde (fréquence). Seuls les lasers permettent d'obtenir une onde monochromatique. A chaque couleur du spectre visible correspond une longueur d'onde.

Couleur	λ en (nm)
Violet	de 400 à 430 nm
Bleu	de 430 à 500 nm
Vert	de 500 à 560 nm
Jaune	de 560 à 585 nm
Orange	de 585 à 620 nm
Rouge	de 620 à 800 nm

III.2.1. Interprétation qualitative de la dispersion de la lumière blanche

a. Les milieux de propagation

Selon leurs comportements vis-à-vis de la lumière, les milieux sont répartis en 3 catégories.

- **Milieux transparents** : les rayons lumineux sont transmis sans changement de direction et sans être ou très peu réfléchies. On peut voir ce qu'il y a derrière eux.

Exemples : vitre transparente, eau, air, ...

- **Milieux opaques** : il ne laisse pas passer les rayons lumineux, soit il les absorbe, soit il les diffuse, aucune lumière ne peut le traverser.

Exemple : mur, bois...

- **Milieux translucide** : ils laissent passer la lumière, mais on ne peut pas distinguer les objets situés derrière eux. Le faisceau sortant n'est plus constitué de rayons parallèles mais de rayons allant dans tous les sens.

Exemples : papier calque, verre dépoli, brouillard, ...

III.2.2. Diffusion et couleur d'un corps

Un corps diffuse de la lumière veut dire que le corps absorbe toute la lumière qui l'illumine et émet presque instantanément une partie dans toutes les directions.

-Si le corps est éclairé par de la lumière blanche et qu'il nous apparaît de couleur rouge alors en principe, il diffuse fortement les couleurs proches du rouge et ne diffuse que faiblement les autres couleurs.

III.2.3. Indice de réfraction d'un milieu

- La vitesse de la lumière dans le vide vaut $c = 3,00.10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La lumière se propage également dans tous les milieux transparents (air, eau, verre, etc.) mais à une vitesse $v < c$.

- L'indice de réfraction (n) d'un milieu est défini comme le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide (c) par la vitesse de la lumière dans ce milieu (v) $\Rightarrow n = c/v$.

- L'indice de réfraction étant défini comme le rapport de deux grandeurs de même unité, il ne possède pas d'unité. Il dépend de la longueur d'onde de la lumière qui traverse le milieu.

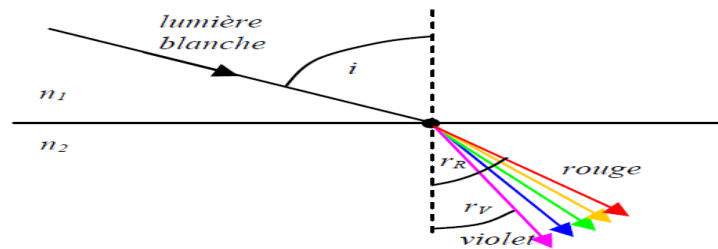
Dans le tableau ci-dessous, on donne quelques indices de différents milieux correspondants à une longueur d'onde moyenne du spectre visible ($\lambda = 0,6 \text{ }(\mu\text{m})$).

Milieu	Indice de réfraction
vide	1 (par définition)
air	1,000293 (en général on prend $n_{\text{air}} = n_{\text{vide}}$)
eau	1,33
verre ordinaire	1,50
diamant	2,40

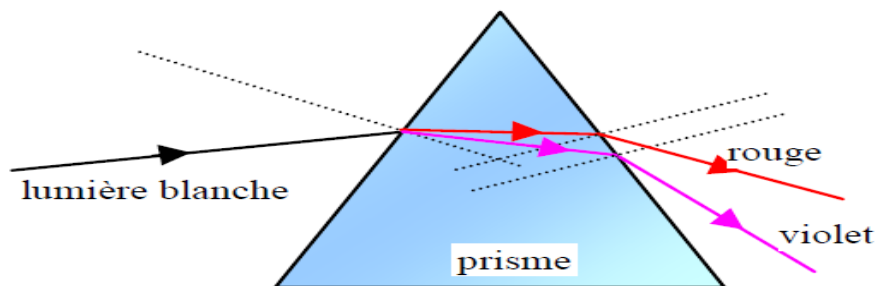
Les matières transparentes (mais pas le vide) possèdent un indice de réfraction n qui dépend de la longueur d'onde de la lumière qui les traverse. La déviation des rayons lumineux dépend donc de la longueur d'onde de leur radiation.

Exemple de l'eau : $n_{\text{rouge}} = 1,330$ et $n_{\text{violet}} = 1,342$.

Les différentes couleurs de la lumière blanche se trouvent ainsi dispersées.



Un prisme est particulièrement efficace pour disperser la lumière car un rayon lumineux convenablement orienté traversant un prisme subit deux réfractions ; ceci amplifie le phénomène de la dispersion.



III.2.4. Réfringence d'un milieu

Un milieu est dit réfringent quand un rayon lumineux change de direction à l'instant où il entre pour le traverser. Un milieu est plus réfringent qu'un autre si la vitesse de propagation de la lumière est plus petite. C'est-à-dire : plus n est grand le milieu est dit plus réfringent.

Exemple : le verre est plus réfringent que l'eau.

III.3. Les lois de propagation de la lumière

III.3.1. Le rayon et le faisceau lumineux

a) Sources lumineuses

C'est l'endroit d'où provient la lumière. Il existe deux types de sources lumineuses :

- **Sources primaires :** produisent leur propre lumière (soleil, étoile, lampe, bougie, laser, ...).
- **Sources secondaires :** objets qui renvoient une partie de la lumière qu'ils reçoivent (miroir, lune, mur, tableau, ...).

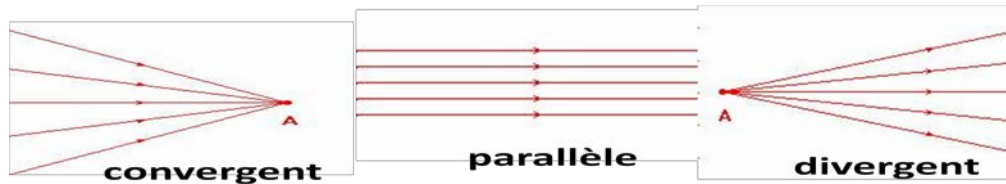
b) Le rayon lumineux

On appelle rayon lumineux la droite ou portion de droite suivi par la lumière.

c) Faisceau lumineux

Un faisceau lumineux est l'ensemble des rayons émis par une même source. Il peut être :

- parallèle, si les rayons qui le constituent sont parallèles,
- convergent, si les rayons qui le constituent, convergent vers un même point,
- divergent, si les rayons qui le constituent, semblent provenir d'un même point.



III.3.2. Principe de Fermat

a- Principe de la propagation linéaire de la lumière

Soit A et B deux points dans l'espace. Pour aller de A à B , la lumière peut emprunter plusieurs chemins. Suivant le principe de moindre action, la lumière suit le chemin le plus court donc suit la ligne droite qui relie A et B . Dans un milieu transparent, isotrope et homogène, la lumière se propage en ligne droite avec une vitesse V indépendante de la direction.

Un milieu *homogène* est un milieu dont l'indice de réfraction est le même en tout point. Il est caractérisé, pour une longueur d'onde donnée, par un seul indice absolu.

Un milieu *isotrope* est un milieu dont l'indice de réfraction ne dépend pas de la direction considérée. Ses propriétés de propagation sont indépendantes de la direction suivie, exemple l'air et le verre.

Si le milieu est inhomogène, la lumière ne se propage donc plus en ligne droite. Dans ce cas, si l'on veut expliquer cette propagation, une bonne approximation consiste à décomposer le milieu en une série de couches homogènes d'indices différents dans lesquelles la trajectoire du rayon lumineux est rectiligne.

b- le chemin optique de la lumière

On appelle le chemin optique $L(AB)$ entre A et B , le long de la courbe C , l'intégrale :

$$L(AB) = \int_{AB} n dx, \text{ avec } n = c/v \text{ et } dx = v dt.$$

$$L(AB) = \int_{AB} \frac{c}{V} \cdot V \cdot dt = c \cdot t.$$

c- Principe du retour inverse de la lumière

Tout trajet suivi par la lumière dans un sens peut l'être en sens opposé et en se superposant exactement.

Considérons un rayon lumineux issu d'un point A , traversant plusieurs milieux et aboutissant à un point B , sans subir de réflexion. Si on inverse le sens de la lumière, en considérant un

rayon lumineux issu du point B et aboutissant au point A , on remarque que la lumière suivra le même trajet entre ces deux points. On dit que le trajet suivi par la lumière est indépendant du sens de propagation.

III.3.4. Objets et images par rapport à un système optique

a. Définition d'un système optique

Un système optique (S) est un ensemble d'éléments optiques (miroirs, dioptrés ou réseaux de diffraction) capable de modifier la trajectoire des rayons lumineux ou les propriétés de la lumière.

Exemples : œil, lentille, microscope, rétroprojecteur, webcam, ...

b. Définition d'un dioptré

Le dioptré est une surface séparant deux milieux transparents, homogènes et isotropes, d'indices de réfraction différents.

- **Milieu homogène** : les propriétés physiques sont les mêmes en tout point du milieu.
- **Milieu isotrope** : les propriétés physiques sont identiques dans toutes les directions de propagation des rayons lumineux.

Un système est dioptrique s'il ne comporte que des dioptrés ; un système est catadioptrique s'il contient un mélange de dioptrés et de miroirs.

Le système optique (S) est représenté par un espace avec deux faces, sa face d'entrée dans laquelle pénètre un rayon incident et sa face de sortie de laquelle sort un rayon émergent. Le système est centré sur un axe appelé axe optique. La lumière se propage conventionnellement de la gauche vers la droite.

c. Définition d'un objet par rapport à un système optique

L'objet est un corps qui réfléchit de la lumière lorsqu'il est éclairé et devient une source lumineuse. Il est le point d'intersection des rayons incidents sur le système optique.

- **Objet réel** : la lumière provient réellement de A (on peut toucher A). Le faisceau incident diverge à partir du point A .
- **Objet virtuel** : A est le point de rencontre d'un faisceau de rayons convergents coupé par le système optique.

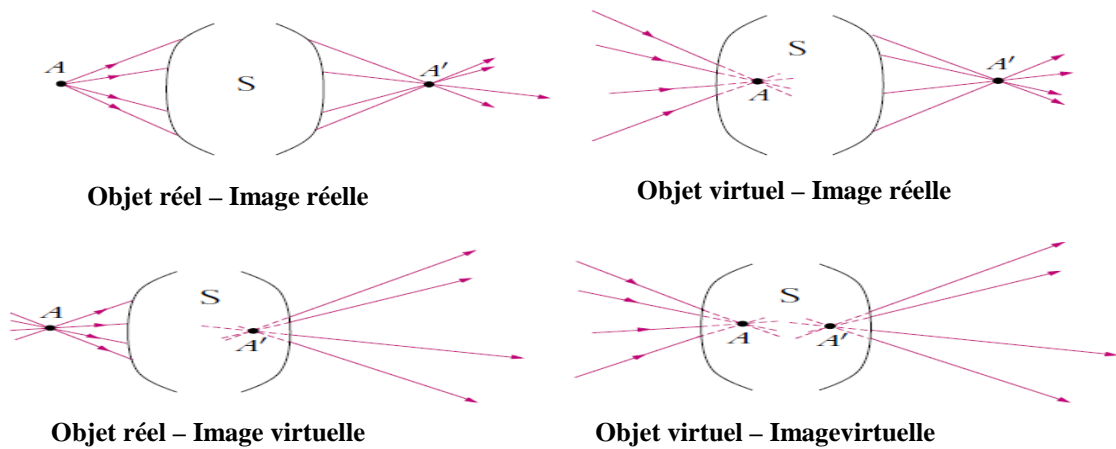
d. Définition d'une image donnée par un système optique

Lorsque les rayons provenant d'un objet traversant un système optique, ils forment une image de l'objet à travers le système. Elle peut être réelle ou virtuelle.

- **Image réelle** : la lumière passe effectivement par A' (on peut visualiser A' sur un écran). Si le faisceau émergent converge vers un point A' de l'espace image.

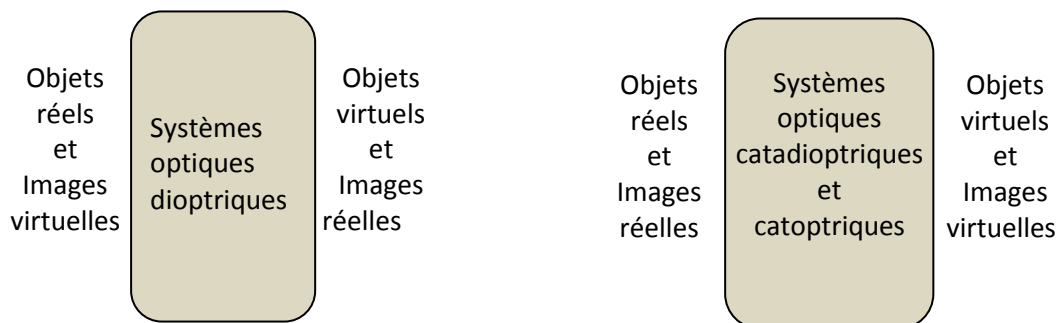
- **Image virtuelle** : A' est le point d'où semblent provenir les rayons émergent du système optique. Les rayons divergents de A' .

Les quatre cas possibles d'objet et d'image sont récapitulés sur les figures suivantes. On représente en pointillés les prolongements des rayons lumineux car ils ne correspondent pas à des trajets réellement suivis.



e. Espace objets et espace image

Pour un système dioptrique, on définit comme espace objet réel et espace images virtuelles, l'espace se trouvant avant le système optique et l'espace des objets virtuels et des images réelles celui qui est après le système optique. Pour les systèmes catadioptrique (miroir + dioptrique) et catoptrique (miroir), on définit comme espace objet réel et l'espace image réelle, l'espace se trouvant avant le système optique et l'espace des objets virtuels et des images virtuelles celui qui se trouve après le système optique.

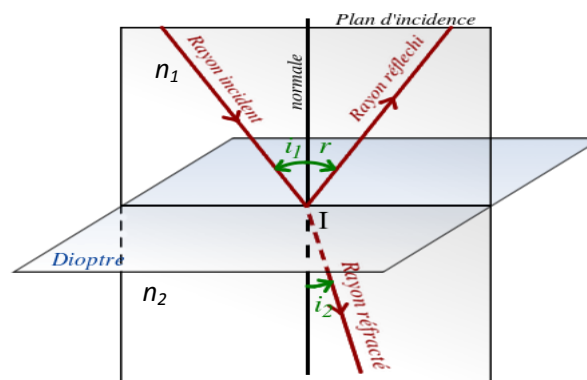


III.4. Lois de Snell-Descartes dans les systèmes optiques

Les lois de Snell-Descartes décrivent le comportement de la lumière à l'interface de deux milieux d'indice de réfraction différent (dioptré).

Soit un rayon incident se propageant dans un milieu d'indice de réfraction n_1 , lorsqu'il arrive au deuxième milieu d'indice n_2 au point I , il sera divisé en deux rayons : un rayon réfléchi et un rayon réfracté. On appelle :

- la droite perpendiculaire à l'interface au point I la normale ;
- i_1 l'angle d'incidence, i_2 l'angle de réfraction et r l'angle de réflexion ;
- le plan formé par le rayon incident et le rayon réfléchi le plan d'incidence.



Lois de Snell-Descartes pour la réflexion :

Le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence.

$$i_1 = -r.$$

III.4. 1. Application de la réflexion au miroir plan

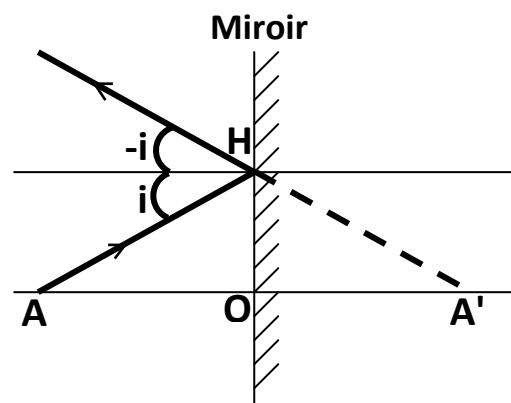
Un miroir plan est une surface plane capable de réfléchir la lumière incidente. Il peut être formé d'un métal poli, ou d'un matériau quelconque (généralement le verre) recouvert d'une pellicule métallique (argent, étain ou d'aluminium). L'argent est le métal idéal pour la réalisation de miroirs car il possède un pouvoir réflecteur élevé. A' est l'image de A à travers le miroir.

Dans le triangle OHA on a : $tg(i) = \frac{\overline{OH}}{\overline{OA}}$

Dans le triangle OHA' :

on a $tg(i) = \frac{\overline{OH}}{\overline{OA'}}$.

D'où $OA = OA'$.



Lois de Snell-Descartes pour la réfraction

L'angle d'incidence i_1 et l'angle de réfraction i_2 vérifient la relation suivante :

$n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2)$, les angles sont orientés à partir de la normale.

Si $n_2 > n_1$, on dit que le milieu (2) est plus réfringent que le milieu (1). Dans ce cas, comme $\sin(i_2) = (n_1/n_2)\sin(i_1)$, $\sin(i_2) < \sin(i_1)$ et $i_2 < i_1$: le rayon réfracté se rapproche de la normale.

Si $n_2 < n_1$, on dit que le milieu (2) est moins réfringent que le milieu (1). Dans ce cas,

$\sin(i_2) > \sin(i_1)$ et $i_2 > i_1$: le rayon réfracté s'écarte de la normale.

Exemple : le milieu 1 est l'air et le milieu 2 le verre ou l'eau. Cela explique le fait qu'un bâton plongé dans l'eau apparaisse cassé.

Remarque : lorsqu'on réalise un schéma, il faut donc prendre soin de dessiner correctement les rayons en fonction des indices de réfraction.

- Réflexion totale

Dans le cas où $n_2 < n_1$, si on augmente progressivement l'angle d'incidence i_1 , le rayon réfracté s'écarte de plus en plus de la normale jusqu'à valoir $\pi/2$. Dans ce cas, si on continue à augmenter i_1 , il ne peut plus y avoir réfraction puisque le rayon réfracté ne serait plus dans le milieu (2). Il existe donc un angle limite r_{lim} pour i_1 , correspondant à $i_2 = \pi/2$ d'où $\sin(r_{\text{lim}}) = n_2/n_1$.

Ainsi, pour $i_1 > r_{\text{lim}}$, il ne peut plus y avoir de rayon réfracté, mais seulement un rayon réfléchi, il y a *réflexion totale*.

- Réfraction limite

Dans le cas où $n_2 > n_1$, le rayon se rapproche de la normale donc le problème de la réflexion totale ne se pose pas. Les angles i_1 et i_2 vérifient $i_2 < i_1$, la valeur maximale de i_2 correspond à $i_1 = \pi/2$ (incidence rasante) pour un angle de réfraction limite telle que $\sin(i_{2,\text{max}}) = n_1/n_2$.

III.4. 2. Application de la réfraction au dioptre plan

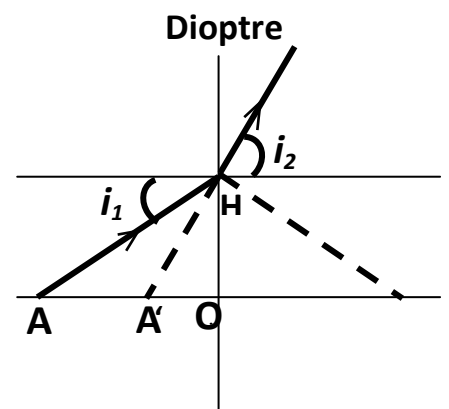
Un dioptre est constitué d'une surface de séparation entre deux milieux homogènes, isotropes et transparents d'indices différents.

Si la surface de séparation est plane, le dioptre est plan.

Dans les triangles AOH et A'OH On a

$$\text{tg}(i_1) = \frac{OH}{OA} \quad \text{et} \quad \text{tg}(i_2) = \frac{OH}{OA'}$$

Pour les petits angles



$$tg(i_1) = \sin(i_1) = i_1 = \frac{\overline{OH}}{\overline{OA}} \quad \text{et} \quad tg(i_2) = \sin(i_2) = i_2 = \frac{\overline{OH}}{\overline{OA'}}$$

On a d'après la loi de réfraction de Descartes :

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

$$\text{On obtient } n_1 \frac{\overline{OH}}{\overline{OA}} = n_2 \frac{\overline{OH}}{\overline{OA'}} \Rightarrow \frac{\overline{OA}}{n_1} - \frac{\overline{OA'}}{n_2} = 0.$$

Cette relation est appelé « relation de conjugaison », c'est une relation qui relie la position de l'objet à celle de l'image en fonction des indices de réfraction des deux milieux.

III.5. Le rayonnement Laser

Le mot laser est un acronyme, venant de l'anglais (light amplification by stimulated emission of radiations). Il veut dire amplification de la lumière par stimulation de radiation.

Les lasers sont des appareils qui produisent ou amplifient un rayonnement électromagnétique cohérent et directif pour des longueurs d'onde situées dans le domaine optique des ondes électromagnétiques couvrant l'infrarouge, le visible et l'ultraviolet.

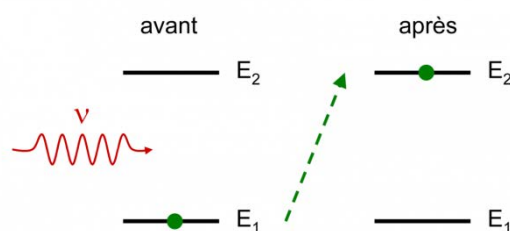
III.5.1. Le principe de fonctionnement du laser

a) le processus atomique

Au niveau atomique, trois processus sont possibles.

-Lorsqu'un électron est soumis à une onde électromagnétique, l'électron peut passer du niveau d'énergie fondamental E_1 au niveau d'énergie excité E_2 par absorption de photon d'énergie $h\nu$ tel que :

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (\text{effet d'absorption})$$

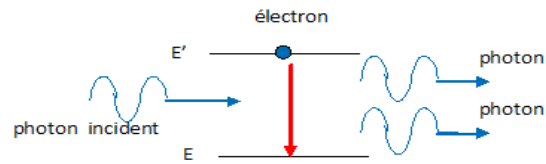


- Spontanément, une transition peut s'effectuer du niveau excité E_2 , vers le niveau fondamental E_1 par émission d'un photon d'énergie :

$$h\nu_{21} = E_2 - E_1 \quad (\text{effet d'émission spontanée}).$$

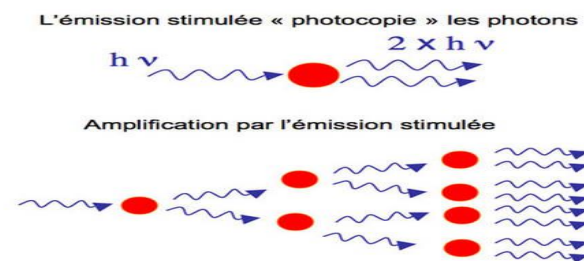
Le photon émet peut prendre n'importe quelle direction.

- un photon incident peut interagir avec un atome dans un état excité. Cela conduit à une des excitation et l'émission d'un autre photon ayant les mêmes caractéristiques que le photon incident. Il s'agit du phénomène d'émission stimulée.



On obtient ainsi deux photons de même fréquence.

Si on excite deux atomes avec deux photons identiques issus de l'émission stimulée, on obtiendra alors quatre (4) photons et ainsi de suite.



Cela constitue alors une onde électromagnétique, ayant sa propre fréquence. On peut donc observer un rayon laser lumineux dans le spectre visible mais on peut aussi avoir des rayons X, ultraviolets infrarouges et micro-ondes. Tous les photons sont dans des états identiques et l'intensité lumineuse est augmentée, on nomme cela "lumière cohérente". On obtient ensuite un rayon très pur de ce fait une lumière monochromatique.

III.5.2. Obtention de l'effet laser

Le laser est constitué de quatre (4) éléments principaux.

- **Un milieu actif** ou il y a les atomes que l'on va pomper. Ce milieu peut être sous 3 états : gazeux, solide ou liquide.
- **Une source de pompage** qui permet d'envoyer de l'énergie dans le milieu actif pour exciter les atomes qu'il contient et produire l'émission stimulée. Cette énergie peut être : électronique, lumineuse ou chimique.
- **Un miroir réfléchissant** est un miroir de sortie partiellement transparent qui ne laisse s'échapper qu'une partie de la lumière produite sous forme de rayon laser, celle qui se propage dans une direction perpendiculaire au miroir tandis que l'autre partie se réfléchit et permet d'entretenir l'émission stimulée.

III.5.3. Les caractéristiques de la lumière laser

Le laser est une source lumineuse possédant des propriétés particulières.

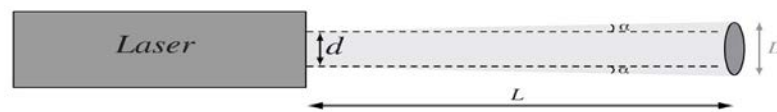
a) Monochromatique

Les lasers sont constitués de source de rayonnements ayant tous la même longueur d'onde. Cette dernière, donne la couleur du faisceau lumineux qui dépend du milieu laser utilisé et des caractéristiques du pompage optique.

Exemple : Le laser He-Ne émet une radiation rouge de longueur d'onde $\lambda = 632,8 \text{ nm}$.

b) Directivité

Le faisceau laser est peu divergent. Il se propage dans une seule direction. La divergence α est de l'ordre de mrad.



Le diamètre D de la tache à la distance L est donnée par : $D = d + 2L \operatorname{tg}(\alpha)$.

Avec la divergence du faisceau laser.

c) La cohérence : toutes les ondes sont en phase.

- **Cohérence spatiale :** deux points de la source situés sur un même plan perpendiculaire à la direction du faisceau présente un déphasage nul.
- **Cohérence temporelle :** l'émission laser s'effectue par trains d'ondes très long.

d) L'intensité d'un laser

L'énergie rayonnée par un faisceau laser est concentré dans un pinceau très étroit. Il est donc intéressant de déterminer l'intensité I du laser qui est la puissance P à la section S du faisceau.

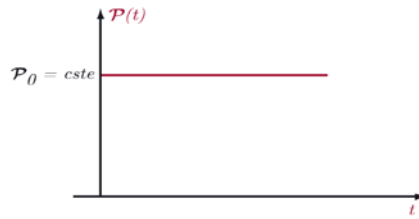
$$I = P/S \quad (P \text{ en (W)}, S \text{ en (m}^2\text{)} \text{ et } I \text{ en (W.m}^{-2}\text{)}).$$

I c'est la puissance par unité de surface, qui s'exprime en nombre de watts par m^2 .

III.5.4. Les types de fonctionnement d'un laser

La puissance des lasers est très variable. Le laser possède deux types de fonctionnements.

- **Fonctionnement continu :** si l'énergie apportée est continue, les atomes stimulés à redescendre vers le niveau d'énergie inférieure, sont rapidement excités pour remonter vers le niveau d'énergie supérieure. Ils ont une puissance relativement faible. En revanche, l'intensité lumineuse I est importante (le diamètre du faisceau est faible). Les lasers à décharges continues ont une puissance de l'ordre de mW .



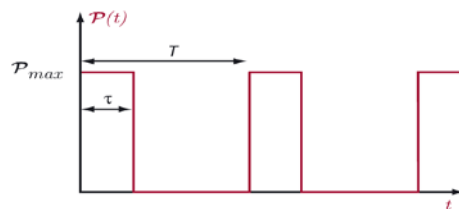
Exemple

Pour un laser He-Ne, $P = 2 \text{ mW}$ et de rayon du faisceau cylindrique est $r = 0,04 \text{ (mm)}$,

l'intensité rayonnée I est : $I = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{\pi(0,4 \cdot 10^{-3})^2} = 4 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

- En fonctionnement pulsée (laser à puissance)

Les atomes sont excités par apport d'énergie périodique. La multiplication des photons se poursuit jusqu'à ce que tous les atomes aient été stimulés à redescendre vers le niveau d'énergie inférieure. Le processus se répète avec chaque nouvelle impulsion.



La puissance émise est : $P_{moy} = P_{max}(\tau/T)$. Ils peuvent atteindre des puissances très grandes pendant des intervalles de temps très petits.

Exemple : Un laser à CO_2 émet une puissance de 10 GW pendant 1 ns.

III.5.5. Les différents types de laser

Il existe six familles principales de lasers, classifiées selon la nature du milieu excité.

Les lasers peuvent émettre une lumière continue ou impulsionnelle tel que les lasers femto seconde (fréquence d'impulsion de 10^{-12} secondes). La fréquence des impulsions est tellement élevée qu'ils paraissent continues à l'œil.

a. Laser à Gaz

Le milieu laser est un gaz atomique ou moléculaire placé dans un tube en verre ou en quartz.

Le faisceau obtenu est très resserré et les fréquences d'émissions peu étendues.

Le laser hélium-néon (rouge 632.8 (nm)) est très utilisé dans le bâtiment-travaux-publics pour les alignements et mesures, ainsi que dans les lasers de spectacle.

Le laser CO_2 est capable de libérer beaucoup d'énergie (en utilisation impulsionnelle). Il est très utilisé pour le marquage, la gravure et la découpe de matériaux.

b. Lasers cristallins

A la différence des lasers à gaz, le milieu laser est solide, tels que des cristaux ou du verre. Pour que le solide devienne un milieu laser, celui-ci est dopé (ajout d'une impureté) à l'aide d'un ion. La longueur d'onde du laser dépend surtout de l'ion, même si le milieu solide a lui aussi un peu d'influence. Ces lasers sont énergétiques et sont utilisés dans la soudure, le marquage et la découpe de matériaux.

c. Lasers à fibre

Ce type de milieu laser est similaire à un laser cristallin. La fibre optique est dopée avec des ions de terres rares. De la même manière que les lasers solides, la longueur d'onde dépend de l'ion. Ce milieu laser est relativement récent, moins coûteux, prend peu de place et selon l'énergie produite ne nécessite pas obligatoirement de refroidissement.

d. Lasers à colorant moléculaires

Un colorant moléculaire en solution liquide est prisonnier d'une fiole en verre. La longueur d'onde d'un tel laser peut être affinée à l'aide d'un prisme. Ceci permet une grande précision du laser. C'est le choix du colorant qui détermine principalement la couleur du laser.

e. Lasers à diode

C'est ce type de laser que l'on retrouve en majorité dans l'industrie. Il est basé sur la technologie des semi-conducteurs. Ce type de laser ne nécessite pas de milieu laser volumineux, les appareils peuvent donc être extrêmement compacts (pointeurs lasers). Ils sont également peu coûteux.

La diode laser est très utilisée dans les télécommunications et lecture optique. Elle a, cependant, une précision moindre que la plupart des autres types de laser, mais reste très adaptée pour de nombreuses applications.

f. Lasers à électron libre

Ce ne sont pas des lasers classiques. Au lieu d'utiliser le rayonnement issu de la désexcitation d'atome, il utilise le rayonnement produit par l'accélération d'électrons. Ce type de laser ne peut exister qu'au contact d'un accélérateur de particules, tel qu'au CERN .

III.5.6. Les applications du laser

Les applications lasers sont extrêmement variées, sont classés dans le tableau ci-dessous.

Objectifs	Transfert d'information	Sciences de matériaux	Médical	Militaire	Loisirs
Applications	Lecteur DVD Imprimantes Fibres optiques Lecteur de codes barres	Soudures Découpe Perçage Décapage	Ophtalmologie Dermatologie Urologie : destruction de calcul urinaire	Armes anti-missile Aide à visé	Spectacles son et lumière Laser gamme

Toutes ces applications reposent sur les propriétés du faisceau lumineux, monochromatique et rectiligne ainsi que sur sa capacité énergétique. Un laser permet une grande précision, tout en intervenant à distance.

Utilisation du laser en médecine

Le laser est très utilisé en médecine car il permet d'effectuer la chirurgie avec une très grande précision sans pénétrer à l'intérieur du corps et de limiter le risque d'infection. Sa première utilisation remonte à 1961 pour opérer une tumeur de la rétine. Aujourd'hui, on le trouve en :

- Chirurgie : Bistorte laser à CO₂, Coagulation par laser.
- Ophtalmologie : Microchirurgie de la myopie et la cataracte et certains glaucomes et décollement de la rétine.
- Dentisterie : soins des gencives et de traitement de caries.
- Dermatologie : chirurgie esthétique (élimination des poils, cicatrices, taches brunes ou des tatouages).
- ORL : destruction des tumeurs des branches ou de la trachée.

III.5.7. Laser et sécurité

Certains lasers émettent un faisceau lumineux extrêmement énergétique pouvant provoquer des brûlures de la rétine voire de la peau.

Ainsi, il existe une classification des lasers en fonction de leur dangerosité. Les mesures de sécurité doivent être adaptées au type de laser utilisé.

- Classe 1 : sans danger (imprimantes, lecteur CD/DVD).
- Classe 1M : l'observation directe du faisceau à travers un instrument optique peut s'avérer dangereuse.
- Classe 1C : lasers en contact avec la cible, telle que la peau humaine (épilation).
- Classe 2 : lasers émettant un rayonnement visible. L'œil est naturellement protégé en fermant la paupière (lecteur de codes barres).
- Classe 2M : lasers émettant dans le visible comportant les mêmes risques que ceux de la classe 1M.
- Classe 3R : l'exposition peut-être dangereuse pour les yeux dans les conditions les plus défavorables.
- Classe 3B : laser toujours dangereux en cas de contact visuel direct du faisceau.

- Classe 4 : nécessite de grandes précautions d'utilisation. Des rayonnements de réflexions diffuses peuvent également être dangereux. Il peut causer des dommages sur la peau et des risques d'incendie existent.

III.6. La Spectrométrie optique

La spectrométrie optique regroupe plusieurs méthodes d'exploration qui permet tant de déterminer la composition chimique, la structure ou doser des molécules en étudiant le comportement d'une onde électromagnétique en présence d'un échantillon (molécules). On a trois méthodes, la fraction absorbée du rayonnement (spectrométrie d'absorption UV-visible, IR), la polarisation du rayonnement transmis (polarimétrie et dichroïsme circulaire) ou la réémission d'un rayonnement (diffusion élastique, fluorescence, phosphorescence).

III.6.1. Interaction matière – lumière

La lumière est une onde électromagnétique. Elle peut interagir avec les dipôles stables ou induits et donc avec la matière. Quand un photon rencontre une molécule, il peut être réfléchi, transmis ou absorbé. Seuls les photons dont le quantum d'énergie correspond à des niveaux d'énergie autorisés de la molécule peuvent être absorbés. Ce phénomène est discret.

III.6.2. Différents niveaux d'énergie - diagramme de Jablonski

- Énergie totale d'une molécule : $E_T = E_e + E_v + E_r$, avec : $E_e > E_v > E_r$.

Énergie électronique E_e : distribution des électrons sur les différentes orbitales atomiques.

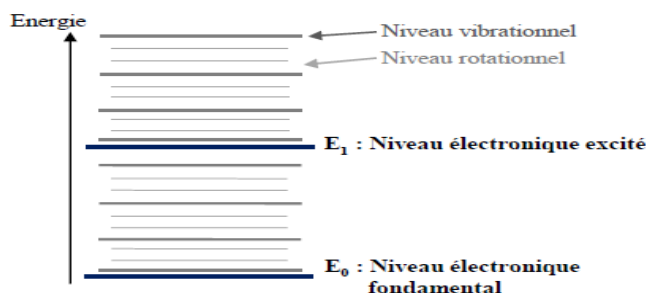
Énergie vibrationnelle E_v : vibration des atomes (constituant la molécule) les uns par rapport aux autres.

Énergie rotationnelle E_r : Rotation de la molécule autour de son centre de gravité.

Un même niveau électronique possède plusieurs niveaux vibrationnels.

Un même niveau vibrationnel possède plusieurs niveaux rotationnels.

Ces différents niveaux d'énergie sont représentés par le diagramme de Jablonski.

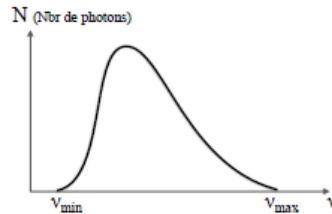


III.6.3. Les différents types de spectres de rayonnement

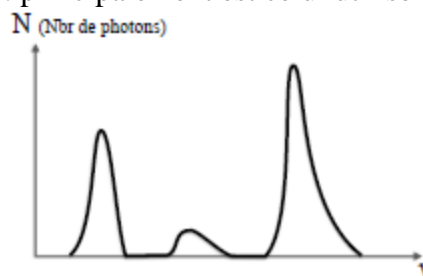
On distingue 3 types de spectres de rayonnement électromagnétique :

- a) Spectre continu.

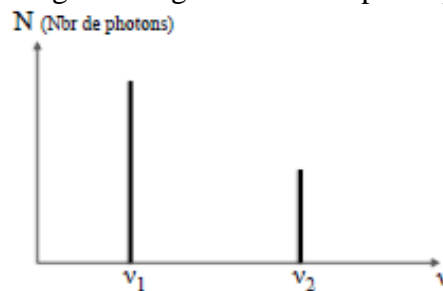
Exemple : lumière blanche



- b) Spectre de bandes : principalement est celui utilisé en spectrométrie optique.



- c) Spectre de raies : énergie et longueur d'onde spécifique



III.6.4. Les différentes spectrométries optiques

a- Spectrométrie d'absorption UV - visible (100 à 800 (nm))

Cette méthode est très utilisée. Elle répond à des problèmes simples comme le dosage (concentration). Comme elle répond à des problèmes complexes (structure et mouvement des molécules).

L'absorption de la lumière UV et/ou Visible de longueur d'onde de 100 à 800 nm provoque une transition électronique entre le niveau électronique fondamental (le plus peuplé) et un niveau électronique excité. En fonction de la longueur d'onde, on mesure une diminution de l'intensité lumineuse, la transmission ou la transmittance est donnée par $T = \frac{I}{I_0} \cdot 100$.

Avec I_0 est l'intensité initiale du rayonnement de la source lumineuse utilisée et I l'intensité du rayonnement transmis après traversée de l'échantillon.

Cela permet de calculer l'absorbance A , telle que $A = \log \frac{1}{T}$

L'absorbance est donnée aussi par la relation de Beer-Lambert suivante : $A = \varepsilon \cdot c \cdot l$

Avec

ε : coefficient d'atténuation molaire ou d'absorption moléculaire ($\text{l} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$).

l : épaisseur de l'échantillon traversée (cm).

c : concentration molaire (mol/l).

Applications

Les longueurs d'onde non absorbées sont :

Molécule	Couleur de la lumière non absorbée
<i>Chlorophylle</i>	<i>Vert</i>
<i>Carotène</i>	<i>Orange</i>
<i>Oxyhémoglobine</i>	<i>Rouge</i>

- Dosages biologiques : acides aminés aromatiques (tryptophane, tyrosine, phénylalanine).
- Dénaturation de l'ADN : ADN dénaturé (2 brins séparés) = augmentation de la lumière absorbée.
- Mesure de cinétique enzymatique.
- Oxymétrie de pouls : mesure de la saturation en O_2 d'hémoglobine .

b - Spectrométrie d'absorption infrarouge (IR)

Absorption des rayonnements IR ($\lambda > 800 \text{ nm}$) peut provoquer une transition électronique entre états vibrationnels et rotationnels associés à l'état électronique fondamental. Les rayonnements IR ne sont pas assez énergétiques pour provoquer des transitions électroniques mais font vibrer les atomes de la molécule. Nous pouvons ainsi accéder à des informations structurales et/ou à la pureté du produit.

Applications

- Synthèse organique – Détection des molécules biologiques – Spectroscopie IR peptides et protéine.

c- La fluorescence

La fluorescence est l'émission de lumière après absorption dans l'UV ou le visible. groupement chimique responsable de l'émission de fluorescence est le Fluorophore.

Cette méthode est basée sur le spectre de l'intensité de fluorescence en fonction de la longueur d'onde (les spectres d'absorption et d'émission sont différents).

Le rendement quantique de fluorescence est donné par :

$$\phi_F = \frac{\text{Nombre de photons émis par fluorescence}}{\text{Nombre de photons absorbés}}.$$

Applications

- Marquage de sécurité par fluorescence des Billets de banque.
- Microscope à fluorescence.
- Senseurs fluorescents : Détection et dosage d'analytes.
- Photodiagnostic médical (cellules cancéreuses).

Série d'exercices

Exercice 1

1– Calculer la longueur d'onde dans le vide $c = 3,00 \cdot 10^8$ (m.s⁻¹), dans l'eau $v = 2,25 \cdot 10^8$ (m.s⁻¹) et dans le diamant $v = 1,25 \cdot 10^8$ (m.s⁻¹) d'une lumière monochromatique verte, de fréquence $\nu = 6 \cdot 10^{14}$ (Hz).

2– Dans une pierre précieuse, la vitesse de la propagation d'une lumière monochromatique est de l'ordre de $1,9 \cdot 10^8$ (m.s⁻¹). Déterminer son indice de réfraction.

- Calculer la longueur d'onde de cette lumière dans la pierre sachant que sa fréquence est $\nu = 5 \cdot 10^{14}$ (Hz).

- Calculer la quantité d'énergie transportée par un photon de cette lumière.

3– Calculer l'énergie d'un photon dans un rayonnement UV monochromatique, de longueur d'onde $\lambda = 315$ (nm). On donne $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ (J. s) et $c = 3,00 \cdot 10^8$ (m.s⁻¹).

- Calculer l'énergie absorbée par une mole matière si chaque molécule absorbe un photon (on donne $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ mol⁻¹).

Exercice 2

La longueur d'onde d'une radiation lumineuse, qui se propage dans un milieu transparent d'indice n avec une vitesse $v = 2 \cdot 10^5$ (km/s), est $\lambda = 475$ (nm).

- Calculer la fréquence de cette radiation et l'énergie transportée par un photon.

- Calculer l'indice de réfraction du milieu traversé.

- Calculer la longueur d'onde de cette radiation lorsqu'elle est propagée dans le vide, va-t-elle changée de couleur ?

- Un rayon lumineux de cette radiation émise par une source ponctuelle S située dans l'air à 4 (cm) de la surface séparatrice (air/milieu d'indice n), tombe sous une incidence $i = 30^\circ$ sur cette surface.

- Calculer l'angle de réfraction r pour ce rayon et donner la position de l'image S' de S.

Exercice 3

Un verre a l'indice $n = 1,595$ pour la lumière rouge et $n = 1,625$ pour la lumière violette. Un rayon de lumière blanche, qui contient ces deux couleurs, se propage dans ce verre et arrive à la surface de séparation avec l'air sous une incidence de 35° .

1. Calculer l'angle que font, dans l'air, les rayons rouge et violet.

2. Calculer l'angle de réfraction limite dans le verre pour ces deux longueurs d'onde.

Exercice 4

Une femme de 1,65 (m) souhaite acheter un miroir où elle peut se voir de plein pied.

Quelle est la hauteur minimum d'un tel miroir ?

A quelle distance du miroir doit-elle se tenir. (On supposera que ses yeux se situent à 10 (cm) au dessous du sommet de son crâne).

A quelle distance par rapport au miroir doit-elle se poster ?

Exercice 5

Un laser médical émet un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 10.6$ (μm). Il possède deux types de fonctionnements :

- fonctionnement continu, de puissance 50 (W) ;
- fonctionnement pulsé, de puissance 300 (W).

Les impulsions ont une durée d'une milliseconde, une fréquence de 300 (Hz) et, à sa sortie, le faisceau est concentré sur une tache de diamètre $d = 0,1$ (mm).

1. A quel domaine du spectre correspond cette longueur d'onde.
2. Calculer, au niveau de la tache, la puissance surfacique (intensité lumineuse) dans le cas du continu et dans le cas du pulsé.
3. Calculer l'énergie transférée pendant 5 seconde pour les deux types de fonctionnement.
4. Choisir le mode de fonctionnement pour les deux applications suivantes :
 - découpe de tissus humains avec vaporisation de l'eau et carbonisation ;
 - cautérisation : coagulation des protéines

Chapitre IV

Les rayonnements

Introduction

La médecine dans son domaine de diagnostic et thérapeutique fait beaucoup appel aux rayonnements électromagnétiques sous forme de rayons X, γ ou aux rayonnements particuliers β . Ce chapitre a pour but d'étudier les différentes ondes électromagnétiques (EM) et leurs caractéristiques ainsi que leurs interactions et leurs effets sur la matière.

IV.1. Définition et classement des rayonnements

Un rayonnement est composé d'un grand nombre de radiations et la radiation est un phénomène périodique caractérisé par une seule longueur d'onde (monochromatique) qui se propage dans l'espace.

Les rayonnements électromagnétiques sont toujours émis à partir de la matière, soit au niveau périphérique (des électrons) ex: Rayons X, soit à un niveau du noyau atomique ex: Rayons γ . On classe les rayonnements selon leur nature et leur effet sur la matière biologique.

Selon leur nature, on distingue les Rayonnements électromagnétiques (R.E.M) et les rayonnements particuliers. Selon leur effet sur la matière biologique, on distingue les rayonnements ionisants dont l'énergie est suffisante pour ioniser un atome et les rayonnements non ionisants dont l'énergie $E < 13.6 \text{ eV}$.

IV.1.1. Les rayonnements électromagnétique (R.E.M)

Les rayonnements électromagnétiques sont formés de la combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui vibrent sinusoidalement dans deux plans perpendiculaires. Les rayonnements E.M sont classés en fonction de la longueur d'onde, de la fréquence ou de l'énergie (voir le chapitre III).

IV.1.2. Rayonnements particuliers (corpusculaires)

Les rayonnements particuliers sont les rayonnements ayant une masse au repos non nulle. Dans le domaine médical les rayonnements utilisés sont les e^- , les noyaux d'hélium (particules α), les protons et rarement les neutrons. On les classe selon leur charge.

-Particules chargées

les rayonnements interagissent avec les électrons de la matière cible. On distingue les particules légères (rayonnement β^+ et β^-) et les particules lourdes (les protons, les ions,

les particules α et les résidus de fission nucléaires).

Ces particules pénètrent dans la matière avec une énergie cinétique.

En mécanique classique cette énergie cinétique est donnée par $E_c = \frac{1}{2}mv^2$. m est la masse de la particule (constante) et v sa vitesse.

En mécanique relativiste, la masse n'est plus une constante et l'énergie s'exprime en fonction de :

$$m = m_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ (la masse selon la relativité d'Einstein).}$$

$$E_c = mc^2 = m_0 c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Avec $E_0 = m_0 c^2 = 9,11 \cdot 10^{-31} (3 \cdot 10^8)^2 \approx 0,511 \text{ MeV}$ est l'énergie de la masse d'un électron au repos.

Le domaine d'énergie exploité en médecine est $E_c [0,02, 20] \text{ MeV}$

- Les particules non chargées

Du fait de leur neutralité électrique, ces particules perdent de l'énergie essentiellement par collisions nucléaires. Ces collisions se font avec les noyaux atomiques conduisent aux différentes réactions nucléaires possibles.

IV.2. La radioactivité

Certains nucléides se transforment spontanément au cours du temps. Cette transformation correspond à un changement de nature du noyau. Cette transformation se fait par émission de rayonnement particulaire α ou β ou par fission spontanée ou par capture électronique et/ou émission de rayonnement électromagnétique γ

Cela se passe pour les noyaux lourds ou qui ont un excès de neutron ou de proton.

Ces noyaux sont dits « Radioactifs » ils se désintègrent.

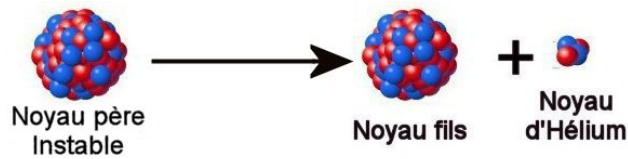
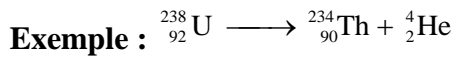
IV.2.1. Les différents rayonnements radioactifs

a) Rayonnement α

La radioactivité α correspond à l'émission de noyaux d'hélium ${}^4_2\text{He}$ (autrefois appelés rayons ou particules α avant la découverte de l'hélium) par certains noyaux. Ce type de radioactivité concerne les noyaux présentant un excès de nucléons et appelés « noyaux lourds » ($A > 200$).

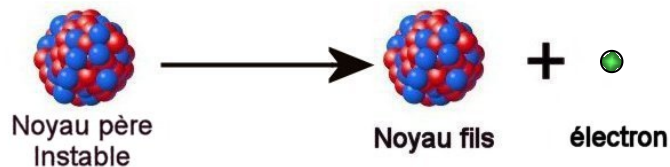
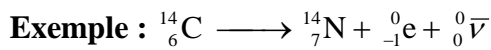
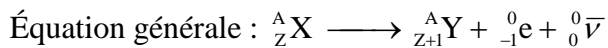
Équation générale : ${}^A_Z\text{X} \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He}$

L'énergie libérée au cours de la désintégration est : $Q = (m_X - m_Y - m_{\text{He}}) \cdot c^2$



b) Rayonnement β^-

La radioactivité β^- correspond à l'émission d'électrons (appelés particules β^- avant la découverte de l'électron) par certains noyaux. Ce type de radioactivité concerne les noyaux présentant un excès de neutrons.



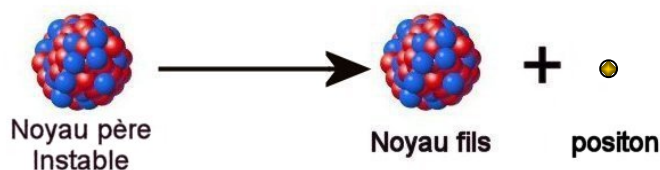
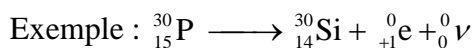
c) Rayonnement β^+

La radioactivité β^+ correspond à l'émission de positrons (ou positons) par certains noyaux. Les positrons sont les antiparticules des électrons. Ce type de radioactivité concerne les noyaux présentant un excès de protons.

La radioactivité β^+ existe surtout pour les nucléides artificiels (préparés dans des réacteurs nucléaires ou dans les accélérateurs de particules). Elle est extrêmement rare pour les nucléides naturels. Le premier nucléide artificiel a été créé en 1934 par I. et F. Joliot-Curie.



On omettra le neutrino ν .



Les particules β ont une énergie qui n'est pas quantifiée. Mais le nombre de positons ou électrons est maximum pour une énergie de 0,58 MeV

d) rayonnement γ

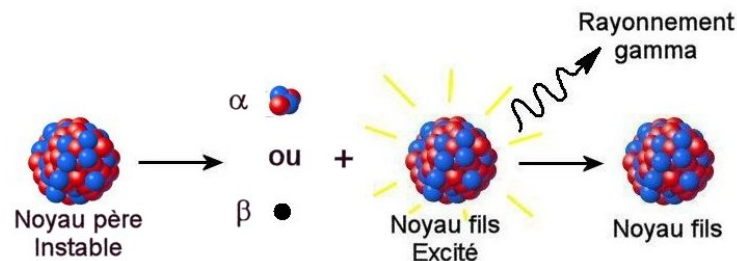
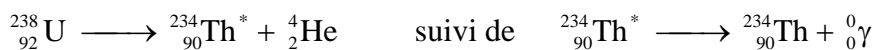
Si le noyau fils issu d'une désintégration radioactive α ou β est dans un état excité, l'excédent d'énergie est libéré sous forme de rayonnement électromagnétique γ de très haute fréquence (de l'ordre de 10^{20} Hz).

Un noyau dans un état excité est représenté avec un astérisque en exposant à droite.

L'équation générale s'écrit: ${}^A_Z X^* \longrightarrow {}^A_Z X + {}^0_0 \gamma$

Exemple :

Associée à la radioactivité α



IV.2.2. Loi de désintégration radioactive (loi de décroissance) :

La radioactivité est un phénomène aléatoire, impossible de prévoir à quel moment un noyau radioactif va se désintégrer. Mais on peut déterminer sa probabilité de se désintégrer par seconde. Cette probabilité s'appelle la constante radioactive λ . Elle est liée au radionucléide et indépendante des conditions physiques ou chimiques et de l'âge de l'atome.

a. Expression du nombre d'atomes de radionucléide en fonction du temps

Soit un nombre $N(t)$ d'atomes radioactifs d'une espèce présents à la date t .

Entre t et $(t + dt)$ un certain nombre de noyaux se sont désintégrés et ont changé de nature.

On appelle dN la variation du nombre d'atome du nucléide entre ces deux dates. Cette variation est proportionnelle au nombre $N(t)$ d'atomes à la date t , dépend du nucléide considéré et de la durée dt .

$$dN = -N(t) \lambda dt \quad (\text{car il y a diminution de } N(t))$$

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

$$\int \frac{dN(t)}{N} = \int -\lambda dt$$

$$\ln N(t) = -\lambda t + \text{cnste}$$

à $t=0$ on a $N(t) = N_0$ d'où $\text{cnste} = \ln N_0$

$$\ln \frac{N(t)}{N_0} = -\lambda t$$

d'où $N_{(t)} = N_0 e^{-\lambda t}$

λ : constante radioactive du nucléide

N_0 : nombre d'atomes présents à la date $t=0$.

La décroissance radioactive suit une loi exponentielle.

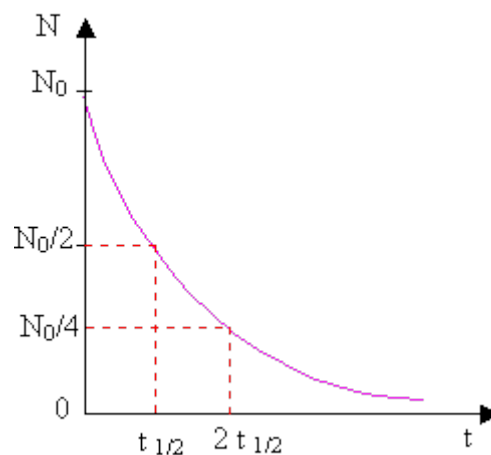
b. Période radioactive :

La période T ou $t_{1/2}$ est le temps nécessaire pour que la moitié des N_0 atomes présents à la date $t=0$ soient désintégrés.

$$\frac{N(t)}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,69}{\lambda}$$

Les périodes T des différents radioéléments couvrent un domaine très vaste, de $T > 10^{30}$ ans pour le vanadium à $T < 2.96 \cdot 10^{-7}$ s pour ${}^{212}_{84}\text{Po}$



Représentation de la courbe décroissance radioactive

C. Activité radioactive

L'activité A radioactive est égale au nombre moyen de désintégrations par seconde.

$$A = N_{\text{désint.}} / \Delta t = - \Delta N / \Delta t \quad (A > 0)$$

Elle s'exprime en becquerels dont le symbole est Bq (1 Bq = 1 désintégration par seconde).

L'ancienne unité d'activité est le Curie (Ci), avec $1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Bq}$.)

$$A = - \Delta N / \Delta t = \lambda \cdot N = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$A = \lambda \cdot N$$

L'activité suit la même loi de décroissance exponentielle que N .

L'activité décroît rapidement au début de l'émission, pour se stabiliser vers la fin de l'émission. L'activité d'une source servira à la datation d'un objet.

Remarque : L'activité est un nombre de désintégration par seconde, et non un nombre de rayonnement émis par seconde.

d. Période biologique et période effective

Lorsqu'on incorpore un radionucléide dans l'organisme, l'élimination de l'activité s'effectue par la combinaison de la décroissance radioactive du radionucléide et de l'élimination biologique. De façon parallèle au processus physique, on a défini une période biologique T_b qui correspond au temps nécessaire à l'organisme pour éliminer la moitié des noyaux radioactifs. On a : $dN = - N(t) \lambda_p dt - N(t) \lambda_b dt = - N(t) \lambda_e dt$ d'où la période effective T_e est telle que $\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T} + \frac{1}{T_b}$ avec T_b est la période biologique.

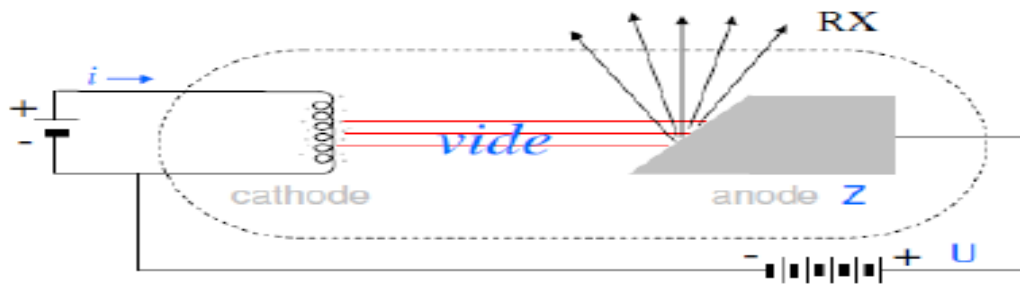
IV.3. Les rayons X

Les rayons X sont des photons produits par l'interaction des électrons avec la matière en injectant des électrons des couches internes des éléments constituant cette matière.

Ils sont des rayonnements électromagnétiques de très courte longueur d'onde (0,03 nm à 10 nm). Ils sont émis par le bombardement de la surface d'un solide par des rayons cathodiques qui sont des faisceaux d'électrons accélérés par des tensions variant entre 10^3 et 10^6 V.

IV.3.1. Production des Rayons X

Les rayons X utilisés en médecine sont généralement produit par des tubes à RX dit tube de Coolidge dont le principe est représenté sur la figure suivante :



Dans ce cas l'émission des électrons est obtenue par effet thermoélectrique à l'aide d'un filament chauffé par un courant électrique i . Les e^- sont accélérés jusqu'à la cible à l'aide d'un champ électrique intense obtenu par l'intermédiaire d'une ddp U .

Avec : U qui varie de 30 à 150 KV pour les tubes de radio diagnostique et quelques centaines de KV pour les tubes utilisés en radiothérapie.

Le filament émetteur constitue la cathode (-), la cible constitue l'anode (+). Ces électrodes sont placées dans une enceinte de verre où l'on fait un vide poussé. Le tube est entouré de blindage en plomb percé par une fenêtre d'où émergent les RX.

IV.3.2.Spectre des rayons X

L'émission des RX est due aux interactions des e^- rapides et les particules du métal dans lequel ils pénètrent. Ces électrons ont une énergie $E_0 = e \cdot u$.

a- Le spectre continue de freinage

Lorsqu'un électron d'énergie cinétique s'approche du rayon de charge positive, il sera freiné brusquement ensuite rayonne de l'énergie sous forme d'une onde électromagnétique :

$$E = E_0 - E_f = h\nu$$

Avec : E_f énergie cinétique finale des électrons.

$E_f < E_0$ les (e^-) sont freinés.

Trois possibilités peuvent se présenter :

- l'électron incident subit un freinage complet $h\nu = E_0 = eU$;
- l'électron incident perd une partie de son énergie $0 < h\nu < E_0$;
- l'électron passe sans aucune perte d'énergie : aucun photon X émis.

b- Spectre caractéristique

Les collisions des électrons incidents avec les électrons de l'anode aboutissent à des ionisations. L'atome qui a perdu un électron d'une couche profonde possède un excès d'énergie, le retour à l'état fondamental se fait par émission d'un ou plusieurs photons X dont

l'énergie totale à ω ; (énergie d'ionisation), on obtient ainsi un ensemble de raies X. Pour les atomes de tungstène, les principales raies sont les raies L aux alentours de 12KeV et des raies K aux alentours de 60KeV.

IV.3.3. Rendement d'émission X de freinage

Le rendement d'émission est $\rho = \frac{\phi}{P} = KZU$;

Avec : Φ : flux émis par le tube ;

P : puissance électrique dépensée ;

Z : numéro atomique (exemple pour le tungstène $Z=74$).

Exemple

Un tube à anode en tungstène ($Z=74$) fonctionnant sous une tension de 100 kV a un rendement très faible $\rho \cong 1\%$. Le reste de l'énergie est dissipé sous forme de chaleur. Pour augmenter le rendement d'un tube à RX, on a deux solutions.

- ✓ soit on choisit une anticathode de numéro atomique Z_0 élevée, par exemple le tungstène ($Z=74$) ayant un point de fusion de 3000°C est le meilleur élément.
- ✓ Soit on augmente la tension U, mais ceci déplace les spectres du côté des fortes énergies rendant le rayonnement X plus pénétrant et diminue ainsi la qualité des images radiologiques.

IV.4. Interactions des rayonnements avec la matière

L'interaction des rayonnements avec la matière dépend de la nature du rayonnement, de l'énergie de ce rayonnement et de la nature de la matière traversée.

Les rayons X et γ ont le même comportement vis-à-vis de la matière. Lorsqu'un faisceau de photons traverse un matériau, il interagit avec les atomes de ce matériau et en ressort atténué. Cette atténuation est due à la diffusion (changement de direction) et l'absorption (transfert de leur énergie au matériau traversée).

- Loi d'atténuation

Soit N_0 le nombre total de photons arrivant sur un écran par unité de surface.

N_x le nombre total de photons ayant traversé une épaisseur x (les photons transmis).

$$dN_x = -\mu x \quad \text{d'où} \quad N_x = N_0 e^{-\mu x}$$

μ est le coefficient d'atténuation linéique qui est aussi la probabilité d'interaction par unité de longueur, son unité est le cm^{-1} .

De même, si I est l'intensité du rayonnement à l'entrée d'un écran : $I(x) = I_0 e^{-\mu x}$.

μ dépend de l'énergie du rayonnement et du matériau considéré.

On utilise aussi le coefficient massique d'atténuation μ/ρ ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ou $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$). Ainsi on peut, par interposition d'écran, atténuer un faisceau de photons mais jamais l'arrêter complètement.

Si le faisceau traverse plusieurs milieux de coefficients d'atténuation différents $\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots \mu_i$ sur des épaisseurs $x_1, x_2, x_3 \dots x_i$ le nombre de noyaux émergents est donné par :

$$N(x) = N_0 e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3 + \dots + \mu_i x_i)}.$$

Couche de demi-atténuation (CDA)

C'est une épaisseur de matière traversée qui atténue de moitié l'intensité du rayonnement

$$I_{CDA} = \frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu(CDA)} = I_0/2.$$

$$e^{\mu(CDA)} = 2 \Rightarrow \ln 2 = \mu(CDA).$$

$$\Rightarrow CDA = \frac{\ln 2}{\mu}.$$

Exemple :

Le coefficient d'absorption du plomb est 0.79 cm^{-1} pour des photons de 1 MeV.

Calculer la CDA ?

$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{\ln 2}{0.79} = 0.877 \text{ cm}$$

Le plomb est utilisé en médecine nucléaire, radiologie et radiothérapie pour la protection contre les rayonnements ionisants. Pour chaque type de rayonnement, on précise l'énergie et la CDA.

IV.4.1. Les interactions élémentaires

L'atténuation du faisceau de photon X et γ se fait selon plusieurs mécanismes, en médecine on s'intéresse à trois types, l'effet photoélectrique, l'effet Compton et l'effet de matérialisation.

a. Effet photoélectrique

L'énergie $E = h\nu$ du faisceau (photon), si elle est supérieure ou égale à l'énergie de liaison du photon. Elle sert à extraire l'électron lié de sa couche et lui transmettre une énergie E_c .

L'électron expulsé épuise son énergie en ionisation et excitation. E_c est totalement absorbée dans la cible. L'électron laisse une place vacante et il y a par conséquent un réarrangement électronique.

Coefficient d'atténuation τ

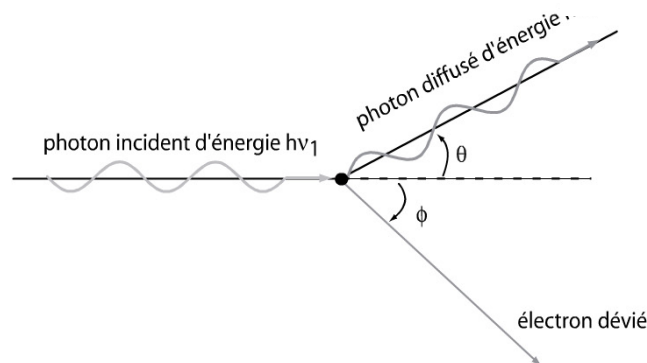
τ est le coefficient linéaire lié à l'effet photoélectrique.

τ/ρ est le coefficient d'atténuation massique.

$$\frac{\tau}{\rho} \propto \frac{kZ^3}{E^3}$$

b. Effet Compton

Quand un faisceau de rayon X ou γ , de fréquence ν et de longueur d'onde λ , est envoyé sur une cible mince, on observe les rayons diffusés dans une direction faisant l'angle ϕ avec la direction du faisceau incident. On constate que la longueur d'onde λ' des photons diffusés est supérieure à λ et que cette longueur d'onde est fonction de l'angle d'observation. Ce phénomène, qui est l'effet Compton, résulte de l'interaction entre le photon incident et un électron. Le photon cède de l'énergie à l'électron et le photon diffusé a une longueur d'onde plus grande. L'énergie d'un électron lié de la cible est de quelques eV. Cette énergie est négligeable devant celle du photon incident et on peut considérer que la vitesse initiale de l'électron est nulle. Compte tenu des valeurs des énergies, il faut utiliser les relations relativistes de la quantité de mouvement et de l'énergie.



Relation de Compton-Debye

à l'état initial :

le photon a une quantité de mouvement $P_1 = h / \lambda$ et une énergie $E_1 = h\nu = h.c / \lambda$.

L'électron a une quantité de mouvement $P_2 = 0$ et une énergie $E_2 = mc^2$.

à l'état final :

le photon a une quantité de mouvement $P'_1 = h / \lambda'$ et une énergie $E'_1 = h\nu' = h.c / \lambda'$.

L'électron a une quantité de mouvement $P'_2 = \gamma.m.v$ et une énergie $E'_2 = \gamma.mc^2$.

m est la masse de l'électron et c la vitesse de la lumière et $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

Conservation de l'énergie : $mc^2 + hv - hv' = \gamma mc^2$ (1)

Conservation de la quantité de mouvement :

Sur l'axe Ox : $hv - hv' \cos \theta = \gamma mcv \cos \varphi$ (2)

Sur l'axe Oy : $hv' \sin \theta = \gamma mcv \sin \varphi$ (3)

En élevant l'équation (1) au carré, on a :

$$m^2c^4 + (hv)^2 + (hv')^2 - 2h^2vv' - 2hmc^2(v' - v) = \gamma^2m^2c^4 \quad (4)$$

En élevant les équations (2) et (3) au carré, la somme donne :

$$(hv)^2 + (hv')^2 - 2h^2vv' \cos \theta = \gamma^2(mcv)^2 \quad (5)$$

La soustraction membre à membre des équations (4) et (5) permet d'écrire :

$$h^2vv'(1 - \cos \theta) = hmc^2(v - v')$$

En passant aux longueurs d'onde, on obtient la relation Compton :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc^2}(1 - \cos \theta)$$

Si $\theta = 0$ (diffusion rasante-choc tangentiel)

Le photon garde sa trajectoire et toute son énergie.

Si $\theta = 180^\circ$ Rétrodiffusion.

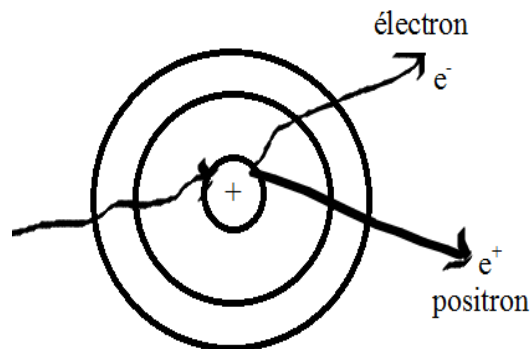
En cas de choc frontal, l'énergie cédée à l'électron est maximum. Celle du photon diffusé est minimum et il est réfléchi.

c. Effet de matérialisation (création de paires)

Le photon incident d'énergie E se matérialise sous forme d'un électron (e^-) et d'un positron (e^+) de même masse m_0 et d'énergie cinétique respective E_{Ce1} et E_{Ce2} .

Le processus se produit pour des photons très énergétiques $hv > 2m_0c^2 = 1.022MeV$ passant à proximité d'un noyau.

L'équation énergétique est $E = 2m_0c^2 + E_{Ce1} + E_{Ce2}$.



L'électron perd son E_c en excitation et ionisation. La probabilité d'interaction par production de paire est dite le coefficient d'atténuation π .

$$\pi=0 \text{ si } E < 1.022\text{meV}.$$

Importance relative des interactions élémentaires

Le coefficient d'atténuation global μ résulte de ces trois effets

$$N_{(x)} = N_0 e^{-\mu x} = N_0 e^{-\tau x} e^{-\sigma x} e^{-\pi x} \Rightarrow \mu = \tau + \sigma + \pi$$

IV.4.2. Interactions des particules

Ce sont des particules directement ionisantes avec les électrons des atomes de la cible ou avec leurs atomes.

L'interaction avec les électrons est dominante jusqu'à des énergies de 100MeV dans l'eau et 10MeV dans le plomb (radioprotection).

a- Interaction avec un électron de l'atome cible (collision)

L'énergie ΔE cédée par la particule incidente est transférée à un électron d'énergie de liaison ω_i de l'atome cible:

Si $\Delta E \geq \omega_i$ il y'a ionisation;

Si $\Delta E < \omega_i$ il y'a excitation.

- Quantification de l'énergie

Notons le transfert de l'énergie linéique par TLE.

Le TLE est la quantité d'énergie transférée au milieu cible par la particule incidente par unité de longueur de trajectoire $TLE = \frac{dE}{dx} \text{KeV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

$$\text{Pour des particules de vitesse } V < C : TLE = \frac{kq^2}{v^2} nZ$$

K : constante ;

q : charge de la particule incidente ;

n : nombre d'atomes de la cible par unité ;

Z : numéro atomique de la cible ;

V : vitesse de la particule.

- Densité linéique d'ionisation DLI

Notons DLI le nombre de paires d'ions créés par la particule incidente par unité de longueur.

$$DLI = \frac{TEL}{\omega_i} \text{ (paires d'ions) } \mu\text{m}^{-1}, \omega_i \text{ est l'énergie moyenne transférée par chaque ionisation.}$$

b- Interaction avec le noyau de l'atome cible

Quand les particules chargées passent à proximité du noyau d'un atome de la cible, leur trajectoire est déviée, ceci entraîne une perte d'énergie cinétique émise sous la forme de rayons X dit rayonnement de freinage.

IV.4.3. Cas de particules chargées (électron et positon)

Les électrons en mouvement rapide sont obtenus par :

- l'émission β^- des radioéléments ;
- des accélérateurs d'électrons ;
- la projection d'électrons secondaires pas des photons.

E_C quelque KeV à quelque MeV.

L'interaction des particules chargées légères avec les électrons est dominante par rapport à celui des noyaux.

L'électron incident est dévié dans le champs coulombien de l'atome cible et ce changement de trajectoire s'accompagne de l'émission d'un rayonnement X appelé rayonnement de freinage. Ce phénomène ne concerne que les électrons de très fortes énergies (plusieurs MeV) et qui de plus traversent un milieu dense.

- La profondeur de pénétration moyenne : est la distance entre le point d'entrée de la particule dans le milieu cible et le point final où la particule s'immobilise. Elle est donnée par :

$$P_{max} = \frac{0.215}{\rho} E(MeV)^{1.66}.$$

avec ρ est la masse volumique de matériau ;

Les P_{max} utilisées en médecine est de l'ordre de quelques centimètre dans l'air et quelques mm dans l'eau.

Dans le cas des particules lourdes (α et p), La masse d'un proton est environ 1840 fois plus grande que celle d'un e^- , les transferts d'énergie sont importants ; dans ce cas la trajectoire est rectiligne.

Dans l'eau : $TLE \sim 150 \text{ keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ et $DLI \sim 4500 \text{ paires d'ions} \cdot \mu\text{m}^{-1}$

La longueur de la trajectoire est :

$$L(cm) = \frac{EMeV}{1500}$$

L ne dépasse pas quelque cm dans l'air et quelque dizaines de μm dans l'eau.

Ces particules peuvent être arrêtées par une simple feuille de papier ou par la couche extérieure de la peau. Elles sont dangereuses par irradiation interne.

IV.4.4. Interaction des neutrons avec la matière

Les neutrons non chargés ne rentrent pas en interaction avec les électrons mais leur énergie cinétique est absorbée par leur interaction avec le noyau jusqu'à l'arrêt total. Les neutrons sont très pénétrant.

Un neutron est rapide si $E_c > 1KeV$, son ralentissement se fait par choc avec les noyaux.

Pour les neutrons lents, l'interaction avec le noyau se traduit par absorption du neutron.

IV.4.5. Application de l'interaction rayonnement-matière en médecine

a. Diagnostic

- Radiographie et scintigraphie (γ et TEP) ;
- Scanner χ .

b. Thérapie

- Radiothérapie externe ;
- Radiothérapie interne : curiethérapie.

IV.5. Dosimétrie

Les rayonnements ionisants ou non ionisants peuvent être nuisibles à la santé ou, au contraire utiles et même nécessaires à la vie d'où la nécessité de bien maîtriser leur dosimétrie.

IV.5.1. La dose absorbée

La dose absorbée est l'énergie déposée par unité de masse ; elle est donnée par :

$$D = \frac{(E_i - E_f)}{dm}$$

Unité : Gray (Gy) avec $1Gy = 1Jkg^{-1} = 100rad$.

E_i L'énergie du rayonnement incident ;

E_f L'énergie du rayonnement final ;

dm Est la masse de l'élément de volume qu'il traverse.

- Débit de dose absorbée

Le débit de dose absorbée indique la dose absorbée par unité de temps

$$D' = \frac{D}{t} = \frac{\text{dose absorbée}}{\text{temps écoulé}} \text{ (Gray /seconde).}$$

En pratique on utilise $\mu Gy.h^{-1}$.

IV.5.2. La dose équivalente

Être irradié par 1 Gy de (γ) et 1 Gy (α) n'est pas la même chose. Il faut introduire un facteur de qualité ω_r . On définit la dose équivalente comme le produit de la dose absorbée

par le facteur de qualité correspondant au type de rayonnement en cause. Le facteur de qualité ω_r dépend de la nature des rayonnements.

La dose équivalente est donnée par : $H_r = D_r \cdot \omega_r$.

ω_r Caractéristique de chaque type de rayonnement est dit facteur de pondération biologique.

Unité en Sievert (Sv) et 1 Sievert = 100 rems.

Les facteurs de qualité sont classés dans le tableau suivant.

Type de rayonnement	Domaine d'énergie	ω_r (sans unité)
Photon (χ, γ)	Quelque soit l'énergie	1
Électron (β)	Quelque soit l'énergie	1
neutrons	E < 10Kev	5
	10Kev à 100Kev	10
	100Kev < E < 2MeV	20
	2MeV < E < 20MeV	10
	E > 20MeV	5
protons	E > 2MeV	5
α noyaux lourd		20

IV.5.3. La dose efficace (E)

La **dose efficace** est une dose biologique très utilisée en radioprotection, qui sert à évaluer l'exposition d'une personne individuelle aux rayonnements. Elle tient compte de la sensibilité des tissus affectés et de la nature des rayonnements. Il s'agit d'estimer le dommage subi par l'ensemble de l'organisme en fonction de l'endroit où les doses sont absorbées et en tenant compte des sensibilités aux radiations qui varient beaucoup d'un organe à l'autre. Une même dose sera plus nocive si elle est absorbée dans les poumons ou le foie que dans les muscles. Il faut introduire un facteur de pondération tissulaire ω_t pour les différents tissus irradiés.

$$H_E = H_r \cdot \omega_t \text{ (en Sievert).}$$

Différentes radiosensibilités pour chaque organe sont données dans le tableau suivant :

Tissu ou Organe	ω_t (sans unité)
Gonades	0.20
Moelle osseuse(rouge)	0.12
Colon	0.12
Poumons	0.12
Estomac	0.12
Vessie	0.05
Sein	0.05
Foie	0.05
Œsophage	0.05
Thyroïde	0.05
Peau	0.01
Surface des os	0.01
Autres	0.05
Total	1

$$\sum \omega_t = 1$$

La dose efficace $E = \sum H_t \cdot \omega_t$

IV.5.4. Le KERMA (Kinetic Energy Released per unit Mass)

Le KERMA est l'énergie transférée par un faisceau ionisant de particules sans charge traversant un milieu quelconque à des particules chargées de ce milieu.

$K_{erma} = \frac{E_{tr}}{m}$ est l'énergie cinétique délivrée par unité de masse

Remarque :

La connaissance de la dose absorbée et du KERMA est très important en radiothérapie en particulier pour les énergies élevées.

IV.5.5. Le produit dose-surface (DAP)

Dose Area Product, en français est PDS (Produit Dose Surface) qui est le produit entre la surface irradiée et la dose.

$$DAP = D \cdot S \text{ son unité est } Gy \cdot m^2$$

IV.6. La radioprotection

Le but de la radioprotection est d'empêcher ou de réduire les risques liés aux rayonnements ionisants.

IV.6. 1. Principes de la radioprotection

La radioprotection est basée sur trois grands principes

- **La justification** : toute irradiation, aussi faible soit elle, doit être justifiée par les avantages qu'elle procure. C'est-à-dire éviter toute exposition inutile pouvant engendrer un risque.

- **L'optimisation** : maintenir les expositions aux rayonnements à un niveau aussi bas qu'il est raisonnablement possible et toujours en-dessous des limites prescrites par la réglementation.

Principe « ALARA » (*As Low As Reasonably Achievable*).

.- **La limitation** : C'est les limites de doses maximales à ne pas dépasser (à s'en éloigner au maximum) pour une irradiation. Si une exposition est justifiée, on doit rechercher des niveaux de dose les plus bas raisonnablement possible, au dessous de limites qu'il est interdit de dépasser.

Les limites de dose sont fixées à partir de l'étude des effets stochastiques. Trois catégories de personnes sont définies.

- Catégorie A : personnel directement affecté à des travaux sous rayonnements ionisants dans des zones où la dose susceptible d'être reçue est supérieure à 6 mSv/an.

- Catégorie B : personnel directement affecté à des travaux sous rayonnements ionisants dans des zones où la dose est toujours inférieure à 6 mSv/an.

- Public

Limites réglementaires sont données dans le tableau suivant.

Limites de dose pour l'exposition extrême en mSv				
Organes	Travailleurs de catégorie A		Travailleurs de catégorie B	Public
	12mois	15jours	12mois	12 mois
Corps entier	5	2	15	5
Organe ou tissus individuels	500	20	150	50
Cristallin	150	6	45	15
Peau	500	20	150	50
Mains, avant-bras, pieds, chevillés	500	20	150	50

- Aucune femme enceinte et aucune femme en période d'allaitement ne peut être affectée à un poste qui ferait d'elle une personne professionnellement exposée.
- Ces limites de doses ne doivent pas être considérées comme un niveau normal d'irradiation du personnel pendant le travail, mais comme une limite que l'on ne doit, en principe, jamais atteindre.
- Ces limites de doses sont des limites de sécurité et non des limites de danger.

IV.6. 2. Règles de la radioprotection

C'est un ensemble de consignes à respecter visant à se protéger contre les irradiations et réduire leurs effets sur les êtres vivants.

Temps : Il faut minimiser le temps d'exposition aux rayonnements au maximum. Plus le temps d'irradiation dure plus la dose reçue augmente.

Distance: Il ne faut pas trop s'approcher des sources (et éviter leurs contact). Il faut observer une certaine distance des rayonnements tout en permettant leurs utilisations.

Écran : En plaçant des écrans entre la source et les individus, les rayonnements seront fortement atténués.

Ex: Paravent, verre et blouse plombés, des gants.

Autres règles

Pour éviter d'introduire des produits radioactifs dans le corps humains, il est consigné de ne pas manger, boire ou fumer dans un établissement utilisant des radionucléides.

Série d'exercices

Exercice 1

Un échantillon de 10 mg d'iode $^{131}_{53}\text{I}$ est radioactif β . Il a une période $T = 8$ jours.

1. Donner la définition de la période radioactive T d'un élément ?
2. Calculer la constante radioactive λ de l'iode $^{131}_{53}\text{I}$.
3. Quelle masse d'iode $^{131}_{53}\text{I}$ reste-t-il au bout de 24 jours ?

Exercice 2

Une substance radioactive dont la demi-vie est de 10 s émet initialement $2 \cdot 10^7$ particules par seconde.

1. Calculer la constante de désintégration de la substance.
2. Quelle est l'activité de cette substance ?

Exercice 3

Pour traiter une hyperthyroïdie, une activité de 400 MBq d'iode-131 est administrée par voie orale à un patient. On considère ici que seule la thyroïde fixe de façon significative ce radioélément émetteur (β^- , γ).

On donne :

Période de ^{131}I : $T = 8$ jours

Période d'élimination biologique de ^{131}I : $T_B = 4$ jours

-Au bout duquel temps l'activité résiduelle est divisée par 2 ?

Exercice 4

Un chercheur renverse sans s'en rendre compte une ampoule scellée contenant 370MBq d' ^{131}I élémentaire en solution à fort coefficient de volatilité. Il travaille 8h00 dans ces conditions avant qu'une personne externe ne découvre l'incident. Calculer la dose efficace reçue par ce chercheur.

Données : volume du labo = $10 \times 4 \times 2.5 \text{ m}^3$

fraction volatilisée estimée à 10%

$h(^{131}\text{I} \text{ élémentaire, adulte}) = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$

Exercice 5

Un tube à rayons X à anticathode de cuivre fonctionnant sous une tension U de 50 kV.

1. Calculer l'énergie cinétique maximale ?

2. Calculer la longueur d'onde minimale?

Exercice 6

Soit un tube à Rayons X, on place, devant ce dernier, un filtre constitué d'une plaque d'aluminium et d'une plaque de cuivre, d'un mm d'épaisseur chacune. Ce filtre permet le passage 35 % d'un faisceau de photons d'énergie égale à 50 keV. On donne $\mu_{\text{Cu}} = 0,69 \text{ mm}^{-1}$
Calculer le coefficient d'atténuation d'aluminium μ_{Al} ?

Exercice 7

Pour une source de cobalt 60, le débit de dose absorbée à 1 m est : $D_{1\text{ m}} = 12 \text{ mGy.h}^{-1}$
Calculer le débit de dose absorbée à 2 m de cette source ?

Chapitre V

Ondes sonores et ultrasonores

Définition

Le son d'un point de vue physique, c'est une vibration se propageant dans un milieu matériel et d'un point de vue physiologique, c'est un signal perçu par le sens de l'ouïe.

Ce phénomène crée une onde acoustique. Cette onde se propage dans toutes les « directions » à une vitesse de 340 m/s (célérité du son dans l'air). Les ondes sonores ont besoin d'un milieu matériel pour se déplacer, elles ne peuvent exister dans le vide. Certains matériaux sont très mauvais conducteurs de son, tels que les corps mous et poreux ; à l'inverse, d'autres sont de très bon conducteurs (l'air et l'eau par exemple).

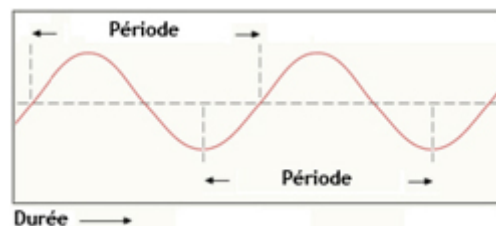
L'onde sonore est une onde mécanique qui nécessite un milieu matériel élastique et déformable pour se propager. Cette onde est une propagation de proche en proche d'une déformation qui provoque localement des variations de pression et des oscillations des molécules autour de leur position d'équilibre.

V.1. Les caractéristiques de l'onde sonore

L'onde sonore est caractérisée principalement par la période, la longueur d'onde, la fréquence, l'amplitude, et la célérité.

V.1.1. La période

La période T correspond au temps qui s'écoule entre deux états vibratoires identiques consécutifs est exprimée en seconde.



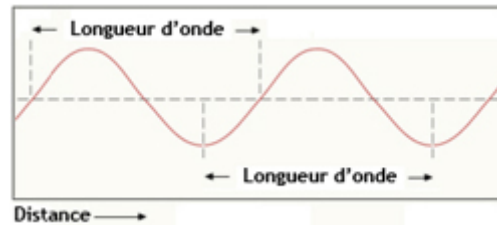
V.1.2. La longueur d'onde

La longueur d'onde (λ) est la plus petite distance séparant deux points ayant le même état vibratoire. Elle est la distance parcourue durant une période. Son unité est le mètre (m). Cette longueur d'onde varie en fonction de la nature et de l'état du milieu de propagation.

La longueur d'onde λ dépend de la période et de la vitesse du milieu de propagation, son expression est donnée par la relation :

$$\lambda = v \cdot T$$

où T est la période exprimée en seconde, et "v " correspond à la célérité ou la vitesse de propagation.



V.1. 3. La fréquence

La fréquence ν est le nombre d'oscillations par secondes, soit le nombre de période par seconde. C'est le nombre de répétition d'un même état vibratoire par unité de temps, son unité est l'Hertz (Hz).

$$\nu = 1 / T$$

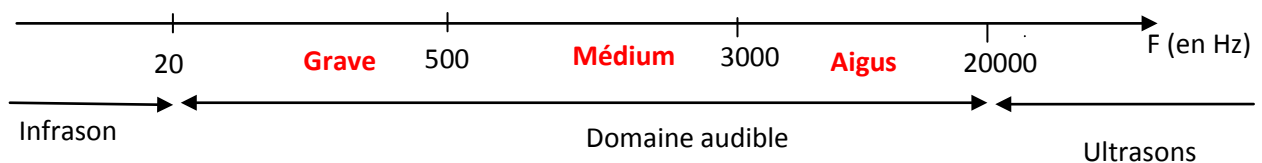
En musique, la fréquence désigne la hauteur du son : c'est à dire le fait que le son soit grave ou aigu. A basse fréquence, le son sera grave tandis qu'à haute fréquence, le son sera aigu.

L'oreille humaine ne perçoit pas les sons de fréquence inférieure à 20 Hertz (les infrasons). Elle ne perçoit pas également les sons de fréquence supérieure à 20 000 Hertz (les ultrasons). Le champ auditif de certains animaux comme les dauphins, les chauve souris, ou encore les chiens s'élèvent au point d'atteindre les ultrasons.

Les sons sont classifiés en quatre catégories, selon leur fréquence: les infrasons, les sons audibles, les ultrasons et les hyper-sons classés dans le tableau suivant :

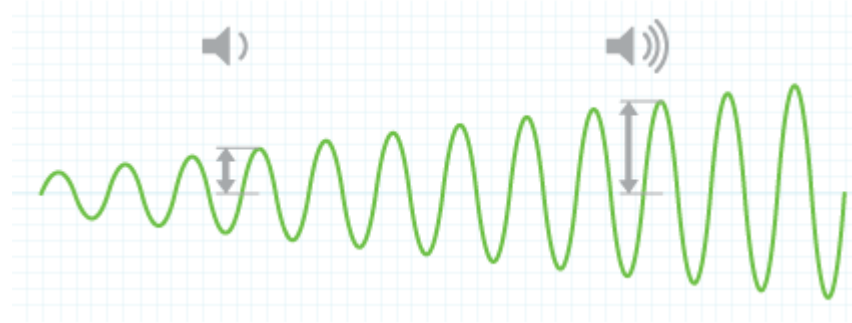
<i>Infra-sons</i>	Fréquences inférieures à 20 HZ
<i>Sons audibles</i>	Fréquences comprises entre 20 HZ et 20 KHz
<i>Ultrasons</i>	Fréquences comprises entre 20 KHZ et 500 MHz
<i>Hyper-sons</i>	Fréquences supérieures à 500 MHz

Tableau V.1 : Classification des ondes acoustiques.



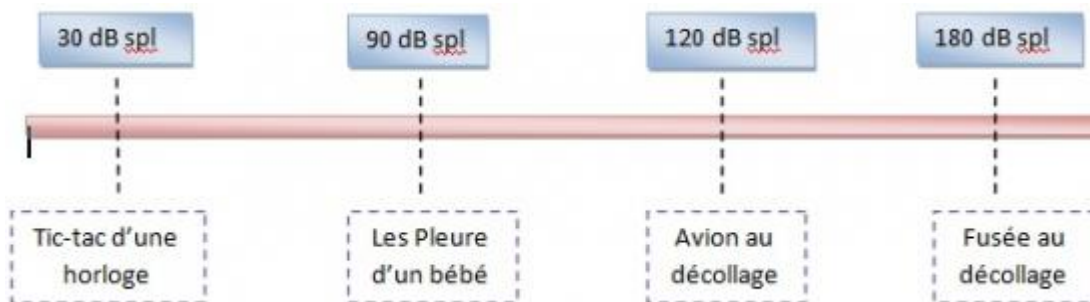
V.1.4. L'amplitude

L'amplitude est l'élongation maximale d'un point à partir de sa position d'équilibre. L'amplitude correspond aux variations de pressions de l'onde sonore. En musique, l'amplitude correspond à l'intensité du son : c'est le niveau sonore. L'intensité du son se mesure à l'aide d'un sonomètre et nous donne des valeurs en décibels (dB), ou SPL pour " Sound Pressure Level ". Ces valeurs sont comprises entre 0 dB et l'infini, mais dans la pratique peu de son dépasse plus de 150 dB Spl.



L'intensité du son augmente en même temps que l'amplitude d'une onde sonore.

Voici des exemples de niveau sonore mesurés à l'aide d'un sonomètre :



V.1. 5. Célérité (Vitesse du son)

La célérité C , exprimée en m/s d'une onde ultrasonore, est la vitesse de propagation de cette onde dans le milieu. Elle dépend uniquement du milieu de propagation, celle-ci est décrite par l'équation suivante :

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

avec E et ρ sont respectivement l'élasticité et la densité du milieu de propagation et C la célérité de l'onde.

Elle est égale à **340 m/s** dans l'air, **1450 m/s** dans l'eau, **1540 m/s** dans les tissus et dans l'os **3300 m/s**. (donc plus le milieu est dense plus la vitesse est grande).

La connaissance de la vitesse du son permet de connaître l'éloignement d'un récepteur par rapport à un émetteur. C'est sur ce principe que fonctionne un sonar, utilisé dans la marine, afin d'éviter les obstacles sous-marin.

De la même manière, il est possible d'évaluer la distance à laquelle on se situe d'un orage. L'éclair donne le signal de départ du son du tonnerre. En comptant le nombre de secondes qui sépare l'éclair du tonnerre, puis en multipliant par la vitesse du son dans l'air, on détermine la distance de l'orage.

V.2. Propriétés du son

V.2.1. L'impédance (Z)

L'impédance acoustique, Z , caractérise la résistance d'un milieu au passage du son. Elle est exprimée en Rayleigh ($1\text{rayl} = 1\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

$Z = \rho c$ avec ρ la masse volumique du matériau et c la vitesse du son dans ce matériau.

<i>milieu</i>	<i>Densité kg/m³</i>	<i>Vitesse m/s</i>	<i>Impédance acoustique Kg.m⁻².s⁻¹</i>
Graisse	0.92 10 ³	1446	1.33 10 ⁶
Muscle	1.07 10 ³	1542-1626	1.65-1.74 10 ⁶
Sang	1.06 10 ³	1566	1.66 10 ⁶
Os	1.38-1.81 10 ³	2070-5350	3.75-7.38 10 ⁶
Cerveau	1.03 10 ³	1505-1612	1.55-1.66 10 ⁶
Fois	1.06 10 ³	1566	1.66 10 ⁶
Rein	1.04 10 ³	1567	1.62 10 ⁶
Rate	1.06 10 ³	1566	1.66 10 ⁶
Poumon	0.40 10 ³	650	0.26 10 ⁶
Air	1.2 10 ³	333	0.40 10 ⁶
Eau distillée	1.00 10 ³	148	1.48 10 ⁶
Tissus mous	800-1000	1450-1700	1.3-1.7 10 ⁶
Acier	7800	6100	47 10 ⁶

Tableau des paramètres acoustiques dans différents milieux.

V.2.2. Pression acoustique (P)

P est la surpression positive ou négative ajoutée par l'onde sonore à la pression de repos (pression atmosphérique = 10⁵ Pa).

$$P = v \cdot \rho \cdot c$$

v : vitesse de vibration des particules, ρ : La masse volumique spécifique du milieu dans lequel se propage le son et c : la célérité du son dans ce milieu.

V.2.3. Puissance acoustique (W)

L'onde sonore correspond à un transport d'énergie. La puissance acoustique est la quantité d'énergie rapportée à l'unité de temps. La puissance acoustique w est égale au produit de la pression acoustique par le flux de la vitesse $W = P \cdot v \cdot s$, elle s'exprime en watts et s est la surface considérée.

V.2.4. Intensité sonore (I)

L'intensité sonore, I , est l'énergie transportée par l'onde par unité de temps et de surface, c'est donc la valeur efficace de la puissance acoustique par unité de surface.

L'énergie étant liée au travail des forces de pression, l'expression de l'intensité sonore instantanée est donc : $I_{ins} = Pv$, où P est la surpression et v la vitesse de déplacement.

Lorsque la vitesse de déplacement a des variations sinusoïdales de période T et d'amplitude v_0 , l'intensité moyenne a pour expression :

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T pV dt = \frac{\rho c}{T} \int_0^T V^2 dt = \frac{1}{2} \rho c V_0^2$$

L'intensité s'exprime en $W \cdot m^{-2}$.

Le niveau sonore N , lié à l'audition, est défini à l'aide d'une intensité de référence I_0 , qui correspond à la plus petite intensité acoustique détectable par l'oreille. Par définition, N est mesuré en décibels (dB) et s'exprime par la relation :

$$N_{dB} = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

avec une intensité de référence $I_0 = 10^{-12} W \cdot m^{-2}$ correspondant à l'intensité minimale audible à 1 kHz.

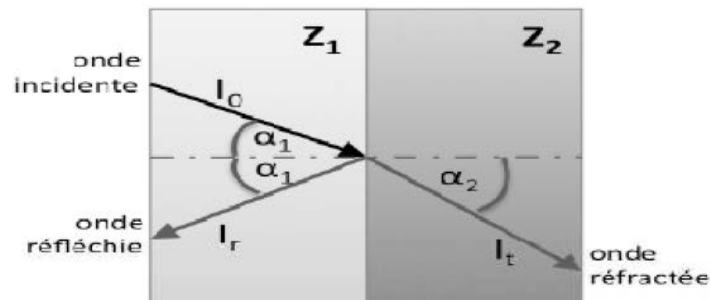
V.3. Interactions de l'onde sonore avec la matière

Lorsque le faisceau sonore ou ultrasonore traverse un milieu donné, il se produit plusieurs phénomènes qui selon leur importance et leurs combinaisons définiront l'image finalement restituée. Ces phénomènes sont : la transmission, la réflexion, la réfraction, la diffusion, l'absorption et l'atténuation. Ils obéissent aux mêmes lois que la lumière (lois de Snell-Descartes) est sont responsables de nombreux artefacts.

V.3.1. Transmission

Lorsqu' une onde passe d'un milieu d'impédance Z_1 à un autre milieu Z_2 , une partie de l'énergie incidente est transmise et l'autre est réfléchi au niveau de l'interface séparant ces deux milieux. La transmission est directement liée à l'impédance acoustique des deux milieux traversés, on peut montrer que :

$$I_{\text{transmi}}/ I_{\text{incident}}= 4Z_1Z_2 / (Z_2+Z_1)^2$$



Phénomènes de réflexion et de réfraction d'une onde ultrasonore à l'interface de deux milieux d'impédance acoustique Z_1 et Z_2 différentes.

V.3.2. La réflexion

L'échogénéicité d'une interface est définie par sa capacité à réfléchir les échos qui lui arrivent. En effet, quand un faisceau d'ondes ultrasonores arrive au niveau d'une interface, une partie est réfléchi et l'autre traverse l'interface (transmise). Dans le cas particulier où l'onde incidente est perpendiculaire à l'interface, les ondes réfléchies et transmises sont également perpendiculaires à l'interface et on parle d'échos spéculaires. Par contre, quand le faisceau d'ultrasons rencontre une interface avec un angle oblique, une partie du signal est réfléchi avec un angle de réflexion égal à l'angle incident, alors que le reste est réfracté. L'angle de l'onde transmise est donné par la loi de Snell-Decarts.

Le faisceau réfléchi repart avec un angle identique à l'angle d'incidence

$$\theta_{\text{réfléchi}} = \theta_{\text{incident}}$$

La réflexion est aussi directement liée à l'impédance acoustique du milieu traversé

$$I_{\text{réfléchi}}/ I_{\text{incident}}= (Z_2-Z_1)^2/ (Z_2+Z_1)^2$$

Plus la différence d'impédance acoustique entre deux tissus est élevée, plus la réflexion est grande. Si l'interface est irrégulière, la réflexion sera omnidirectionnelle et de faible amplitude.

V.3.3. La réfraction

Elle survient lors d'un changement de milieu ou au cours de la propagation dans un milieu non homogène où règne un gradient de température ou de salinité. Dans ce cas, le faisceau transmis ne conserve pas sa direction initiale mais il est partiellement dévié ce que l'on appelle la réfraction. La réfraction se produit avec un angle qui est en fonction des différentes impédances acoustiques, donc des vitesses. On la définit par la loi de Snell-Descartes :

$$\sin \theta_1 / c_1 = \sin \theta_2 / c_2$$

c_1 : vitesse du faisceau incident, c_2 : vitesse du faisceau transmis,

θ_1 : l'angle que fait le faisceau incident avec la normale à la surface qui sépare les deux milieux.

θ_2 : l'angle que fait le faisceau réfracté avec la normale à la surface qui sépare les deux milieux. Plus la différence de vitesse de propagation est grande, plus la réfraction est importante.

V.3.4. La diffusion

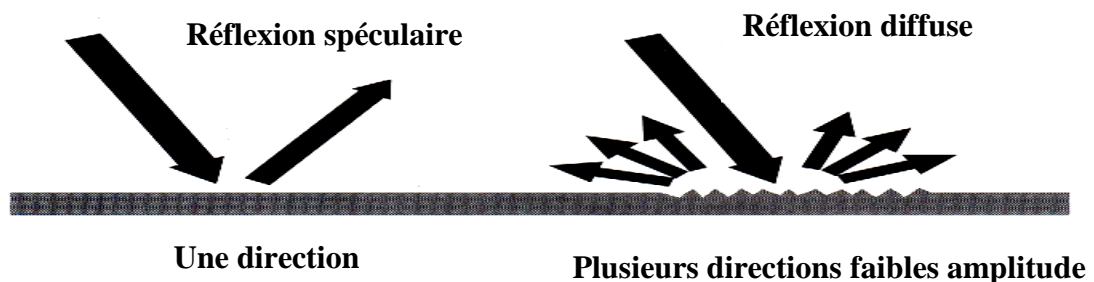
La diffusion correspond à la réémission dans toutes les directions de l'espace d'une fraction minime de l'énergie ultrasonore. Lorsque l'interface est de petite taille par rapport à la longueur d'onde, l'énergie de l'onde est diffusée, c'est à dire réfléchi dans de multiples directions. Soit d la taille de l'interface et λ la longueur d'onde. En fonction du rapport λ/d il est possible de définir trois types de diffusion :

* $d \gg \lambda$ rétrodiffusion

* $d \sim \lambda$ diffusion intégrale

* $d \ll \lambda$ diffusion multidirectionnelle

La diffusion est la réflexion des ondes ultrasonores dans toutes les directions de l'espace, par les obstacles, dits diffuseurs, dont la taille est petite par rapport à la longueur d'onde de ces ultrasons.



V.3.5. L'absorption

Dans un milieu homogène et illimité, l'énergie sonore d'une source décroît comme l'inverse du carré de la distance. Mais dans la réalité, les milieux ne sont ni homogènes, ni illimités. On doit tenir compte de l'absorption du son et de sa transformation en chaleur. L'absorption est due à la transformation de l'énergie mécanique en chaleur par des phénomènes de friction interne (liés à la viscosité) et au temps de relaxation des molécules (durée du retour à leur position initiale entre chaque onde). L'onde sonore cède une partie de son énergie au milieu : il y a absorption de l'énergie, et l'intensité du faisceau diminue. Cette diminution est totalement différente de celle due à l'augmentation de la surface de l'onde. Cette absorption suit une loi exponentielle :

$$I(d) = I_0 e^{-\alpha d}$$

la distance d de la source, I_0 l'intensité initiale et α le coefficient d'absorption du milieu.

V.3.6. L'atténuation

En se propageant dans un milieu, l'énergie de l'onde ultrasonore diminue progressivement le long de sa trajectoire.

Atténuation (dB) = niveau d'entrée (dB) - niveau de sortie (dB).

$$A_{\text{dB}} = N_{\text{edB}} - N_{\text{sdB}} = 10 \log \left(\frac{I_e}{I_0} \right) - 10 \log \left(\frac{I_s}{I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{I_e}{I_s} \right)$$

Plus la fréquence des sons augmentent, plus l'atténuation est importante. La fréquence des ultrasons a donc une influence déterminante sur les possibilités d'exploration.

V.4. Applications des ondes sonores

Le domaine audible d'une onde acoustique se situe pour un sujet jeune entre 20 Hz et 20 kHz. Au-delà, le domaine des ultrasons dans le cas d'applications médicales est utilisé entre 1 et 15 MHz. Lorsque l'effet recherché est destructeur de tissus, on travaille autour de 1 MHz. Dans le cas d'utilisation en échographie abdominale, cardiaque ou gynécologique, la fréquence varie entre 2,5 et 7,5 MHz. Des fréquences encore plus élevées entre 7,5 et 15 MHz sont utilisées en ophtalmie, pour la thyroïde ou le système vasculaire superficiel, lorsque l'on souhaite éviter une pénétration trop importante dans les tissus. L'image ultrasonore haute fréquence (25 à 40 MHz) permet d'avoir accès à la microcirculation avec une résolution de l'ordre de 100 μm .

V.4. 1.Échographie classique

L'échographie utilise les ultrasons pour réaliser une image des tissus humains. La sonde est à la fois émettrice et réceptrice d'ultrasons. Le gel utilisé permet la bonne conductibilité des ultrasons, qui ont une vitesse de propagation similaire que dans le corps humain, tout deux composés essentiellement d'eau. La vitesse de propagation des ultrasons étant relativement constante ; l'image obtenue est nette.

Le principe est le même que pour la plupart des techniques d'imagerie médicale. Les ondes ultrasonores sont émises à une certaine fréquence et intensité par l'émetteur et est renvoyée au récepteur à la rencontre d'obstacle par effet écho.

V.4. 2.Speckle

L'image granuleuse d'une échographie est due à un phénomène nommé speckle. Un tissu biologique est constitué de centres diffuseurs qui sous l'effet d'une onde acoustique vont réémettre une onde sphérique. Cette réémission ne se fait pas au même instant pour tous les diffuseurs, du fait de leur position par rapport à la source qui n'est pas ponctuelle. Le caractère aléatoire de cette réémission conduit à un phénomène d'interférences. En certains points de l'espace, les interférences sont constructives (signaux en phase) et on observe un point brillant. Sinon elles sont destructives et le point est plus sombre.

Ce phénomène peut être atténué par différents filtrages mais il peut également être exploité. En effet, certaines pathologies conduisent à une granulosité différente du speckle. Ceci est utilisé dans le diagnostic du foie.

V.4. 3. Échographie à effet Doppler

L'échographie à effet Doppler est utilisée pour étudier le mouvement de certains organes ou fluides (battement cardiaque d'un fœtus, circulation sanguine). Ce type d'échographie est basé sur un échographe classique auquel on ajoute une sonde Doppler qui permet d'évaluer si le fluide se rapproche ou s'éloigne de la sonde. En effet, le fluide renvoi l'onde vers la sonde par effet écho, et donc devient l'émetteur :

- Si le fluide s'éloigne, la fréquence reçue par la sonde est plus basse que celle émise initialement par l'échographe.
- Si le fluide se rapproche, la fréquence reçue est plus haute que celle émise.
- Le différentiel de fréquence permet de connaître la vitesse de déplacement du fluide ou la fréquence cardiaque d'un fœtus par exemple.

Cette différence Δf entre la fréquence d'émission f_e et la fréquence de réception f_r s'appelle la fréquence doppler. Δf est s'exprime en hertz (Hz). Elle est située dans un spectre audible. Ainsi, l'effet doppler permet de déceler le mouvement des hématies dans un vaisseau. La fréquence doppler s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta f = f_r - f_e = \frac{2f_e V \csc \theta}{c}$$

f_e : fréquence d'émission de la sonde ;

f_r : fréquence de réception de la sonde ;

θ : angle entre l'axe du vaisseau et l'axe du faisceau ultrasonore ;

C : vitesse moyenne des ultrasons dans le corps humain (1 540 m/s) ;

V : vitesse des éléments figurés dans le vaisseau ;

V.4. 4. Destruction par ultrasons

Dans le cas d'une onde acoustique d'intensité élevée, le phénomène de cavitation apparaît. Au foyer du faisceau, il peut se former une cavité qui peut entrer en résonance à la fréquence de l'onde incidente. Cela se traduit par une augmentation brutale du nombre de bulles dans le tissu qui voient leur taille croître rapidement puis explosent en une multitude de microbulles. Il y a formation d'une onde de choc dont l'effet est destructif pour les tissus en dehors de la résonance, la formation de microcavités provoque une augmentation de la température, contribuant ainsi à l'effet de nécrose.

V.4. 5. Principe de la lithotripsie

La lithotripsie utilise des impulsions très brèves de l'ordre de 0,35 μ s permettant d'obtenir des pressions locales pouvant atteindre 1 000 bars. Cette méthode tire profit de la différence d'impédance acoustique entre les tissus mous et le calcul dont l'impédance est 5 à 6 fois plus élevée. L'onde en se réfléchissant sur le calcul va générer une onde de compression. À l'extrémité du calcul, la différence d'impédance va créer une onde réfléchie qui va à nouveau traverser le calcul. Les contraintes appliquées sur un calcul, par nature hétérogène, vont conduire à sa destruction. On observe alors une fragmentation depuis la périphérie vers le centre du calcul.

Exercice d'application

Un concert est donné par deux musiciens. Placé à deux mètres des musiciens, on mesure le niveau sonore produit successivement par chacun des instruments: on trouve $L_1 = 73$

dB et $L_2 = 76$ dB. Calculer l'intensité sonore émise par les deux instruments et le niveau sonore L perçu à la distance $d = 2$ m ?

Comme

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ avec } I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\text{Alors } I = I_0 10^{\frac{L}{10}}$$

$$I_1 = 2,00 \cdot 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{et} \quad I_2 = 3,98 \cdot 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

L'intensité sonore perçue à 2 m des musiciens étant une grandeur additive, sa valeur est

$$\text{donc : } I = I_1 + I_2 = 5,98 \cdot 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\text{Et } L = 10 \log \left(\frac{5,9 \cdot 10^{-5}}{10^{-12}} \right) = 77,8 \text{ dB}$$

Série d'exercices

Exercice 1

Le tonnerre est perçu par un observateur 7,0 s après l'éclair. A quelle distance la foudre est-elle tombée ?

Données: célérité du son dans l'air: 340 ms^{-1} et celle de la lumière : $3,00.10^8 \text{ ms}^{-1}$.

Exercice 2

Les dauphins se communiquent en émettant des ultrasons dont les fréquences sont comprises entre 16kHz et 100kHz. La célérité moyenne des ultrasons dans l'eau de mer est d'environ $5,7.10^3 \text{ km/h}$. Calculer le domaine de longueurs d'onde des ondes émises par les dauphins.

Exercice 3

Un haut-parleur relié à un GBF produit une onde sonore sinusoïdale. Un microphone relié à un oscilloscope capte le son émis. La sensibilité horizontale est de 1 ms/div.

- 1- Quelle est la fréquence de l'onde sonore sachant que la distance entre deux crêtes successives de l'oscillogramme est de 4 divisions.
- 2- Ce son est-il audible ? Pourquoi ?
- 3- Proposer une expérience qui permettrait de déterminer la longueur d'onde de cette onde sonore.

Exercice 4

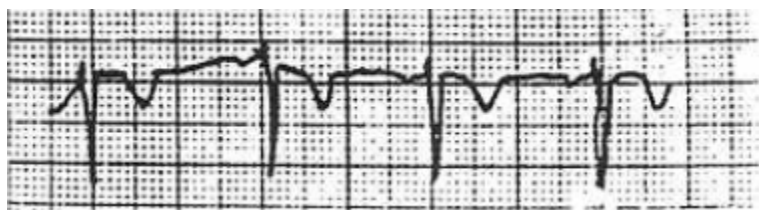
Les niveaux sonores ne peuvent s'additionner arithmétiquement. Seules les énergies peuvent le faire.

- 1- Calculer le niveau sonore pour une oreille qui reçoit une intensité de 10 W.m^{-2} .
- 2- Quelle intensité ne doit pas être dépassée pour une oreille dont le seuil de douleur se situe à 130 dB ?
- 3- Dans une conversation normale, le niveau sonore atteint 50 dB lorsqu'une seule personne s'exprime. Quel niveau est atteint:
 - a- lorsque deux personnes parlent simultanément ?
 - b- lorsque dix personnes parlent simultanément ?

Exercice 5

La courbe ci-dessous est l'enregistrement d'un électrocardiogramme. Calculer le nombre de pulsations cardiaques par minute sachant que le papier défile à

la vitesse $v = 25 \text{ mm.s}^{-1}$.



Quelques Références

- H. Broch, Université de Nice Résumé du cours "Mécanique des Fluides"
- P. Arnaud, Exercices résolus de chimie physique, Dunod, Paris, 2008, 2013 pour la nouvelle présentation ISBN 978-2-10-059850-2
- A. Guinier, "La structure de la matière", éd. Hachette-CNRS, Paris, collection "Liaisons Scientifiques" (1980)
- J. Lachnitt "La mécanique des fluides", éd. PUF, Paris, collection "Que sais-je?" (1969),
- D.C. Giancoli, Physique générale 2, électricité et magnétisme, édition DeBoeck université.
- D.J. Gambini, R. Granier, Manuel pratique de radioprotection. Edition Médicales Internationales, décembre 2000.
- J. Magné et R.M. Magné-Marty, Biophysique, Physico-chimie/physique PCEM1-PCEM2, édition Ellipse
- J. Dutreix, A. Desgrez, B. Bok et J. M. Vinot, Biophysique des radiations et imagerie médicale, collection abrégés, édition Masson
- D.C. Giancoli, Physique générale 3, ondes, optique et physique moderne, édition DeBoeck université.
- Farhi & R. Smadja, Biophysique PCEM 1, D. édition ESTEM.
- J. Sivardière, La symétrie en mathématiques, physique et chimie, Presses Universitaires de Grenoble, 1995
- J.C .Bryan, Introduction to nuclear science, CRC Press, 2009
- S. Belazreg, R. Perdrisot et J.Y. Bounaud, PACES Biophysique UE3, 3^e édition, Dunod, Paris 2014. ISBN974-210-071460-5.
- C. Santamaria, Physique pour les Sciences de la vie et de la santé, cours et exercices corrigés, Dunod, Paris 2012. ISBN978-2-10-058119-1
- É. Amzallag, J. Cipriani, J. Ben Aïm, N. Piccioli, Électrostatique et électrocinétique (cours et exercices), Dunod, Paris 2006. ISBN210 050249 2.