

Chapitre 1 : Applications du principe fondamental de la dynamique.

I Rappel des notions de cinématique

Classe : 12^{ème} SB et SE

Discipline : Physique

Objectif : L'élève doit être capable de :

- définir un mouvement circulaire uniforme ;
- donner les expressions des abscisses curviligne, angulaire et la relation qui les lie ;
- définir la vitesse linéaire et angulaire du mobile ;
- donner l'expression du vecteur accélération dans la base de Frenet ;
- définir la période, la fréquence et écrire la relation qui lie la vitesse angulaire à la période et à la fréquence.

I Mouvements rectilignes.

La trajectoire est une ligne droite.

Soit $x'x$ le support de la trajectoire. O est l'origine et $\vec{i}$ est le vecteur unitaire.

- Le vecteur position est $\vec{OM} = x \cdot \vec{i}$.
- Le vecteur vitesse est $\vec{v} = v \cdot \vec{i} = \frac{dx}{dt} \cdot \vec{i} = \dot{x} \cdot \vec{i}$.
- Le vecteur accélération est $\vec{a} = a \cdot \vec{i} = \frac{dv}{dt} \cdot \vec{i} = \frac{d^2x}{dt^2} \cdot \vec{i} = \ddot{x} \cdot \vec{i}$.

Les trois vecteurs $\vec{OM}$, $\vec{v}$ et $\vec{a}$ sont colinéaires. Fig. I 1.

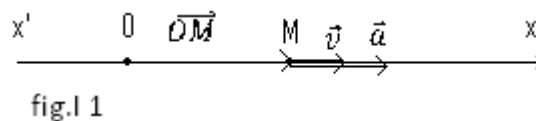


fig. I 1

1. Mouvement rectiligne uniforme :

Le vecteur vitesse est constant $\vec{v} = \overrightarrow{cte} \Rightarrow \vec{a} = \vec{0}$

L'équation horaire du mouvement est $x = vt + x_0$ où x_0 est l'abscisse initiale.

2. Mouvement rectiligne uniformément varié :

Le vecteur accélération est constant $\vec{a} = \overrightarrow{cte}$.

L'équation de la vitesse est $v = at + v_0$.

L'équation horaire est $x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$, v_0 est la vitesse initiale.

Si v_0 croît, le mouvement est accéléré, $\vec{a}$ et $\vec{v}$ ont même sens. Fig. I 2.

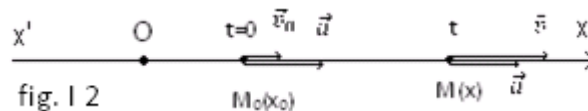


fig. I 2

Si v_0 décroît, la vitesse diminue, s'annule puis change de sens, le mouvement est d'abord retardé, puis accéléré lorsque la vitesse change de sens. Fig. I 3.

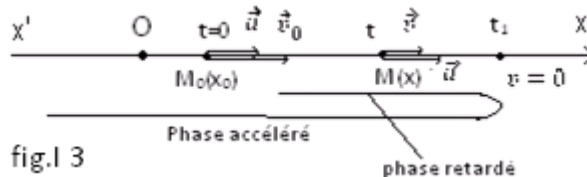


fig. I 3

3. Mouvement rectiligne sinusoïdal :

L'équation horaire du mouvement est une fonction sinusoïdale du temps : $x = x_m \cos(\omega t + \varphi)$.

- x_m est l'amplitude ou l'élongation maximale (en m);
- ω est la pulsation (en rad/s) ;
- φ est la phase initiale (en rad).

La vitesse du point mobile est $v = \frac{dx}{dt} = -\omega \cdot x_m \sin(\omega t + \varphi)$

L'accélération du mouvement est $a = \frac{dv}{dt} = \ddot{x} = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \varphi)$.

$\ddot{x} = -\omega^2 x$ ou $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$ est l'équation différentielle du mouvement.

Tout mouvement rectiligne pour lequel l'équation différentielle est $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$ est vérifié, est un mouvement rectiligne sinusoïdal. x_m et φ sont déterminés à partir des conditions initiales.

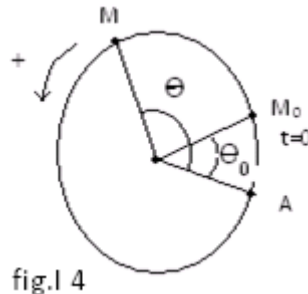
II Mouvement circulaire uniforme :

1. Définition : un point est animé d'un mouvement circulaire uniforme si la trajectoire est un cercle et si vitesse a une valeur constante. Le cercle est généralement défini par son centre O et son rayon R (O, R).

2. Abscisse angulaire et curviligne :

Soit A l'origine de la trajectoire orientée dans le sens du mouvement. Fig. I 4.

- L'angle $\theta = (\overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OM})$ est l'abscisse angulaire. Son équation horaire s'écrit : $\theta = \omega t + \theta_0$.
Où ω est la vitesse angulaire et $\theta_0 = (\overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OM_0})$ l'abscisse angulaire initiale.
- L'abscisse curviligne est l'arc $s = \widehat{AM}$. Son équation horaire est $s = vt + s_0$ où $s_0 = \widehat{AM_0}$ est l'abscisse curviligne initiale.
- L'abscisse angulaire est lié à l'abscisse curviligne par la relation : $s = R \cdot \theta$.



3. Vitesse angulaire et linéaire :

- La vitesse angulaire est la dérivée par rapport au temps de l'abscisse angulaire $\omega = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta}$.
- La vitesse linéaire ou simplement vitesse est la dérivée de l'abscisse curviligne par rapport au temps $v = \frac{ds}{dt}$.
- La vitesse est liée à la vitesse angulaire par $v = R\omega$

4. Repère de Frenet : Le vecteur accélération s'exprime très souvent dans la base de Frenet $(\vec{t}, \vec{n})$. Cette base est mobile avec le point M qui es l'origine du repère.

- $\vec{t}$ est le vecteur unitaire de la tangente à la trajectoire au point M et orienté dans le sens du mouvement ;
- $\vec{n}$ est le vecteur unitaire de la normale perpendiculaire à $\vec{t}$ et dirigé vers l'intérieur de la concavité de la trajectoire.

L'accélération s'écrit : $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n = a_t \cdot \vec{t} + a_n \cdot \vec{n}$.

$\vec{a}_t$ est l'accélération tangentielle avec $a_t = \frac{dv}{dt}$

2

l'accélération normale avec $a_n = \frac{v^2}{R}$ où R est le rayon de courbure de la trajectoire.

Pour une droite $\rightarrow \infty, a_n = 0, a = a_t = \frac{dv}{dt}$.

Pour un cercle $R = cte, a_n = \frac{v^2}{R}$ et $a_t = \frac{dv}{dt}$.

Lorsque le mouvement est uniforme $v = cte$ et $a_t = 0$. Fig. I 5.

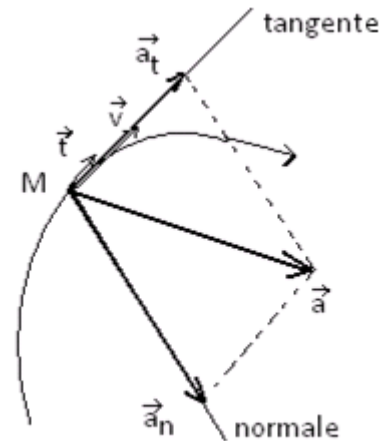


fig. I 5

5. Période et fréquence :

La période est la durée d'un tour.

En posant $\theta_0 = 0$ et $s_0 = 0$ pour une période $s = 2\pi R$ et $\theta = 2\pi \text{ rad}$.

On aura : $2\pi = \omega T$ d'où $T = \frac{2\pi}{\omega}$ et $2\pi R = vT$ d'où $T = \frac{2\pi R}{v}$.

La fréquence f (ou N) est le nombre de période par seconde. $f = \frac{1}{T}$ où f est en Hz.

6. Accélération :

Dans la base de Frenet $(\vec{t}, \vec{n})$ liée au point M , l'accélération est :

$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n = a_t \cdot \vec{t} + a_n \cdot \vec{n}$ le mouvement est uniforme

$v = cte$ et a_t est nulle

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_n = \frac{v^2}{R} = R\omega^2$$

L'accélération angulaire est $\ddot{\theta} = \frac{d\omega}{dt} = R \frac{d^2\theta}{dt^2}$ (en rad/s^2)

Si $v = cte, \omega = cte$ et $\ddot{\theta} = 0$.

Les caractéristiques du vecteur accélération sont :

- Direction : la normale (droite OM) ;
- Sens : vers le centre O (centripète) ;
- Intensité : $a = \frac{v^2}{R} = R\omega^2$. Fig. I 6.

Pour un mouvement circulaire uniforme le vecteur accélération est perpendiculaire au vecteur vitesse.

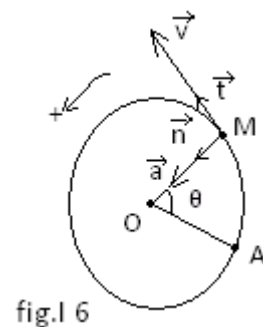


fig. I 6

Classe : 12^{ème} SB et SE

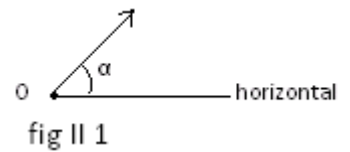
Discipline : Physique

Objectif : L'élève doit être capable de :

- établir les équations horaires ;
- établir l'équation cartésienne de la trajectoire et en déduire la nature du mouvement ;
- définir la portée, la flèche et établir leur expressions ;
- déterminer les angles de tir possibles permettant d'atteindre une portée donnée ;
- définir la parabole de sûreté.

1. Position du problème :

Dans le champ de pesanteur uniforme $\vec{g}$, un projectile de masse m est lancé d'un point O avec une vitesse $\vec{v}_0$ faisant un angle α avec l'horizontal. Fig. II 1.



2. Accélération du centre d'inertie du mobile :

Système : projectile ;

Référentiel : terrestre considéré comme galiléen ;

Bilan des forces : le poids $\vec{P} = m\vec{g}$, l'action de l'air est négligée.

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a} \Rightarrow m\vec{g} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \vec{g}.$$

L'accélération du centre d'inertie du projectile est égale au champ de pesanteur.

Remarque : la masse n'intervient pas dans le mouvement et $\vec{g} = \overrightarrow{cte}$, le champ est uniforme.

3. Equations horaires du mouvement :

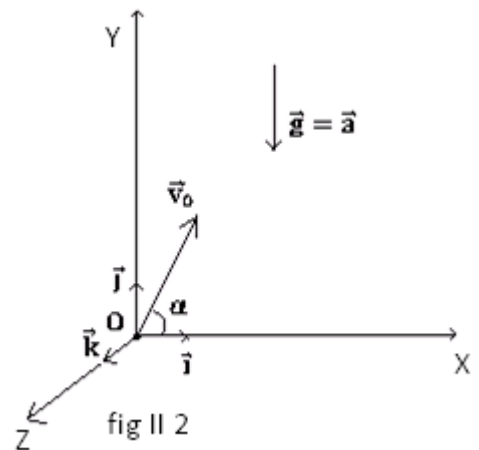
La position du centre d'inertie est étudiée dans le repère cartésien orthonormé $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ dont l'origine coïncide avec la position du centre d'inertie à $t=0$.

Nous choisissons l'axe $(O, \vec{j})$ vertical ascendant, le plan (xoy) contient $\vec{v}_0$ et $\alpha = (\vec{i}, \vec{v}_0)$. Fig. II 2.

Conditions initiales :

A l'instant $t=0$ les coordonnées du vecteur position et du vecteur vitesse sont :

$$\overrightarrow{OM} \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = 0 \end{cases} \quad \vec{v}_0 \begin{cases} v_{0x} = v_0 \cos \alpha \\ v_{0y} = v_0 \sin \alpha \\ v_{0z} = 0 \end{cases}$$



A une date quelconque :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \\ a_z = 0 \end{cases} \Rightarrow \vec{v} \begin{cases} v_x = a_x t + v_{0x} = v_0 \cos \alpha \\ v_y = a_y t + v_{0y} = -gt + v_0 \sin \alpha \\ v_z = a_z t + v_{0z} = 0 \end{cases} \Rightarrow \overrightarrow{OM} \begin{cases} x = \frac{1}{2} a_x t^2 + v_{0x} t + x_0 \\ y = \frac{1}{2} a_y t^2 + v_{0y} t + y_0 \\ z = \frac{1}{2} a_z t^2 + v_{0z} t + z_0 \end{cases}$$

On obtient :

$\overrightarrow{OM} \begin{cases} x = (v_0 \cos \alpha)t \\ y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0(\sin \alpha)t \\ z = 0 \end{cases}$. Ces équations sont appelées équations horaires ou équations paramétriques du mouvement. Elles montrent que :

- Le mouvement de M s'effectue dans le plan (xOy), le plan vertical contenant $\vec{v}_0$ car ($a_z = 0$; $v_z = 0$ et $z = 0$). Il n'y a pas de mouvement suivant l'axe Oz. Le plan (xOz) est le plan de tir.

Le mouvement de la projection M' de M sur l'axe (Ox) est uniforme $a_x = 0$ et $v_x = cte$.

- Le mouvement de la projection M'' de M sur l'axe (Oy) est uniformément varié $a_y = cte$.

4. Equation cartésienne de la trajectoire :

On élimine t dans l'équation : $\begin{cases} x = (v_0 \cos \alpha)t \\ y = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin \alpha)t \end{cases}$

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha} \Rightarrow y = -\frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v_0 \cos \alpha}\right)^2 + v_0 \sin \alpha \left(\frac{x}{v_0 \cos \alpha}\right)$$

$$y = -\frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha \text{ équation cartésienne de la}$$

trajectoire. Cette équation est de la forme $y = ax^2 + bx$ c'est une parabole. Fig. II 3.

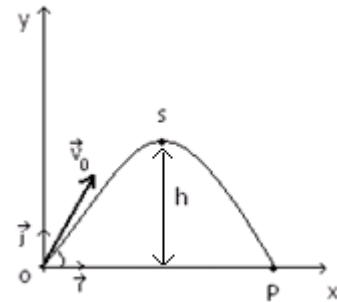


fig II 3

5. Caractéristiques de la trajectoire :

- a. **La portée :** C'est la distance entre le point de lancement et le point de chute (distance $\overline{OP}$ correspondant à l'abscisse du point P. $x_P = \overline{OP}$)

$$y = y_P = 0 \Rightarrow 0 = -\frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha \Rightarrow x \left(\frac{-gx}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + \tan \alpha \right) = 0$$

$x = 0$ correspond à l'origine ;

$$-\frac{gx}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + \tan \alpha = 0 \Rightarrow -\frac{gx}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = 0 \Rightarrow \frac{gx}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \Rightarrow x = \frac{2v_0^2 \cos^2 \alpha \sin \alpha}{g \cos \alpha}$$

$$x = \frac{2v_0^2 \cos \alpha \sin \alpha}{g} \text{ en notant } 2\cos \alpha \sin \alpha = \sin 2\alpha \text{ la portée s'écrit :}$$

$$x_P = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

- b. **La flèche :** C'est l'altitude maximale h atteinte par le projectile. En ce point S la tangente est horizontale et $v_y = 0$.

Soit t_1 la date en S $0 = -gt_1 + v_0 \sin \alpha \Rightarrow t_1 = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$ les coordonnées du point S sont :

$$S \begin{cases} x_S = v_0 \cos \alpha t_1 = v_0 \cos \alpha \cdot \frac{v_0 \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \cos \alpha \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{2g} \\ y_S = -\frac{1}{2}g \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right)^2 + v_0 \sin \alpha \frac{v_0 \sin \alpha}{g} = -\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} + \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \end{cases}$$

La flèche est : $y_S = h = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$ La flèche est maximale pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (tir vertical).

$$y_{smax} = \frac{v_0^2}{2g}.$$

Remarque :

- ⊕ La portée est maximale pour $\sin 2\alpha = 1 \Rightarrow \alpha = 45^\circ = \frac{\pi}{4} \text{ rad}$ d'où $x_{Pmax} = \frac{v_0^2}{g}$;
- ⊕ La portée est telle que $x_P = 2x_S$;
- ⊕ Pour $x_P < x_{Pmax}$, $\frac{v^2 \sin 2\alpha}{g} = x_P \Rightarrow \sin 2\alpha = \frac{gx_P}{v_0^2}$. La résolution de cette équation dans l'intervalle $[0, 2\pi]$ donne deux valeurs de α , α_1 et α_2 , avec $\alpha_1 + \alpha_2 = \frac{\pi}{2}$ (angles complémentaires).
- Pour $\alpha_1 < 45^\circ$ le tir est tendu ;
- Pour $\alpha_2 > 45^\circ$ le tir est plongeant ou en cloche.
- ⊕ Dans la réalité la portée et flèche sont plus faible en raison de la résistance de l'air.

6. Parabole de sureté :

Définition : Il existe une parabole à l'intérieur de laquelle un point M de coordonnées (X,Y) est atteint par le projectile, cette parabole est appelée parabole de sureté. Fig. II 4.

Les coordonnées de M vérifient l'équation de la trajectoire : $Y = -\frac{gX^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + X \tan \alpha$.

$$\text{Or } \frac{1}{\cos^2 \alpha} = \frac{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}{\cos^2 \alpha} = 1 + \tan^2 \alpha$$

$$Y = -\frac{gX^2}{2v_0^2} (1 + \tan^2 \alpha) + X \tan \alpha$$

$$\frac{gX^2}{2v_0^2} \tan^2 \alpha - X \tan \alpha + Y + \frac{gX^2}{2v_0^2} = 0 \text{ ou } \tan^2 \alpha - \frac{2v_0^2}{gX} \tan \alpha + \frac{2v_0^2 Y}{gX^2} + 1 = 0 \text{ c'est une}$$

équation du second degré en $\tan \alpha$ dont le discriminant est : $\Delta = \left(\frac{2v_0^2}{gX}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{2v_0^2 Y}{gX^2} + 1\right)$.

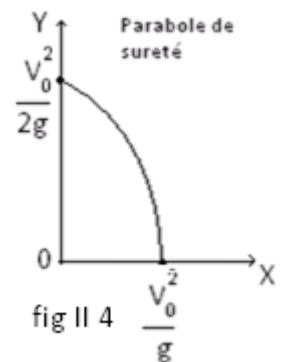
- Si $\Delta < 0$ le point M ne peut pas être atteint ;
- Si $\Delta = 0$, M est atteint pour une seule valeur de $\tan \alpha$ (donc de α) ;
- Si $\Delta > 0$, le point M est atteint pour deux de $\tan \alpha$ (donc de α).

En posant $\Delta = 0 \Rightarrow$

$$\left(\frac{2v_0^2}{gX}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{2v_0^2 Y}{gX^2} + 1\right) = 0 \Rightarrow \left(\frac{2v_0^2}{gX}\right)^2 = 4 \cdot \left(\frac{2v_0^2 Y}{gX^2} + 1\right) \Rightarrow$$

$$\left(\frac{2v_0^2}{gX}\right)^2 - 4 = \frac{8v_0^2 Y}{gX^2} \Rightarrow Y = \frac{gX^2}{8v_0^2} \cdot \frac{4v_0^4}{g^2 X^2} - \frac{4gX^2}{8v_0^2} \text{ en simplifiant :}$$

$$Y = \frac{v_0^2}{2g} - \frac{g}{2v_0^2} X^2$$



Cette équation est l'équation de la parabole de sureté. Le point M est atteint lorsqu'il est à l'intérieur de cette parabole. A l'extérieur de la parabole il n'est pas atteint.

III Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme $\vec{E}$

Classe : 12^{ème} SB et SE

Discipline : Physique

Objectif : L'élève doit être capable de :

- établir l'expression de la vitesse d'entrée dans un champ électrique uniforme ;
- établir les équations horaires, cartésienne et en déduire la nature du mouvement dans le cas du vecteur vitesse initiale perpendiculaire au vecteur champ électrique et dans le cas où ces vecteurs font entre eux un angle α ;
- établir les coordonnées du point de sortie du champ et du vecteur vitesse en ce point ;
- définir la déviation angulaire et la déflexion électrique et établir leurs expressions ;
- décrire l'oscilloscope cathodique et donner son principe de fonctionnement ;
- étudier le mouvement de n'importe quelle particule chargée dans un champ électrique.

I. Champ électrostatique :

1. Champ électrostatique uniforme :

- Le champ électrostatique $\vec{E}$ obtenu entre les armatures A et B d'un condensateur plan soumis à une différence de potentiel $V_A - V_B = U_{AB}$ est tel que $V_A - V_B = \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB}$.
- Le vecteur champ $\vec{E}$ est orthogonal aux armatures, il est dirigée vers les potentiels décroissant (de + vers -). Si $U_{AB} = \text{cte}$, $\vec{E} = \overrightarrow{cte}$ le champ est uniforme.

En posant $V_A - V_B = U_{AB} = U$ la valeur du champ est $E = \frac{U}{d}$ où E en (V/m), U en V et d distance entre les armatures en (m).

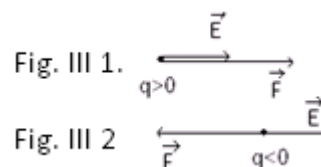
2. La force électrique :

Dans le champ électrique $\vec{E}$, une particule de charge q est soumise à la force électrique $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$. Le poids de la particule est négligeable devant cette force.

Si $q > 0$ $\vec{F}$ et $\vec{E}$ ont même sens. Fig. III 1.

Si $q < 0$ $\vec{F}$ et $\vec{E}$ sont opposés. Fig. III 2.

$\vec{F}$ et $\vec{E}$ sont colinéaires.



3. Travail de la force électrique :

Une particule de charge q arrive à la vitesse v_0 en A dans une zone où règne un champ électrique uniforme $\vec{E}$, sa vitesse en B est v. Fig. III 3.

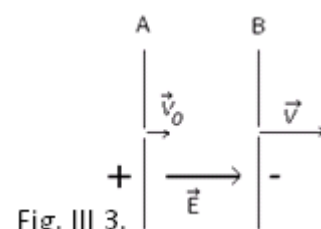
Son énergie cinétique en A et en B est $E_{CA} = \frac{1}{2}mv_A^2 = \frac{1}{2}mv_0^2$ et

$E_{CB} = \frac{1}{2}mv_B^2 = \frac{1}{2}mv^2$.

Le travail de la force électrique entre A et B est :

$$W_{\vec{F}} = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = q\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = q \cdot (V_A - V_B) = q \cdot U_{AB}.$$

Le théorème de l'énergie cinétique appliquée à la particule entre A et B est :



$$\Delta E_C = W_{\vec{F}} \Rightarrow \frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2 = q \cdot U_{AB} \text{ ou } \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = q \cdot U_{AB}$$

- Si $qU_{AB} > 0 \Rightarrow \Delta E_C > 0$; q et U_{AB} ont même signe, le mouvement est accéléré.

- Si $qU_{AB} < 0 \Rightarrow \Delta E_C < 0$; q et U_{AB} sont de signe contraire, le mouvement est retardé.

II. Etude du mouvement :

Le dispositif de déviation est constitué par deux plaques P et P' parallèles et horizontales entre lesquelles on applique une tension constante $U_{PP'} > 0$. Les particules lancées avec la vitesse $\vec{v}_0$ arrivent suivant l'axe du dispositif. Le champ est nul à l'extérieur des plaques, uniforme à l'intérieur de celle-ci.

1. Accélération de la particule :

Système : particule ;

Référentiel : terrestre supposé galiléen ;

Bilan des forces :

- Le poids (négligeable devant la force électrique) ;
- La force électrique $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$.

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a} \Rightarrow q \cdot \vec{E} = m \cdot \vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m} \quad \vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}$$

2. Equation cartésienne de la trajectoire entre les plaques de déviation :

Etudions le mouvement d'un électron de charge ($q = -e$) et de masse m dans le repère cartésien $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$.

La particule est préalablement accéléré à partir d'une vitesse nulle, elle entre dans le champ en O avec la vitesse $\vec{v}_0$. La tension accélératrice est U_0 .

Le théorème de l'énergie cinétique donne :

$$\frac{1}{2}mv_0^2 - 0 = qU_0 \Rightarrow v_0 = \sqrt{\frac{2qU_0}{m}}$$

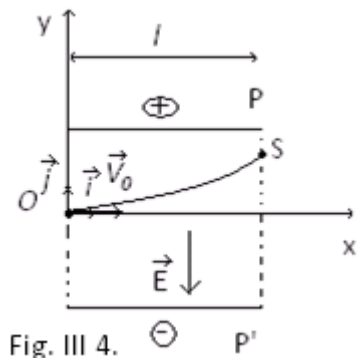


Fig. III 4. $\ominus$ P'

a. Equation horaire :

A l'instant $t=0$ les coordonnées du vecteur position et du vecteur vitesse initial sont :

$$\overrightarrow{OM}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = 0 \end{cases} \quad \vec{v}_0 \begin{cases} v_{0x} = v_0 \\ v_{0y} = 0 \\ v_{0z} = 0 \end{cases}$$

A un instant t quelconque, les coordonnées du vecteur champ, du vecteur accélération, du vecteur vitesse et du vecteur position sont :

$$\vec{E} \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = -E \\ E_z = 0 \end{cases} \Rightarrow \vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -\frac{qE}{m} \\ a_z = 0 \end{cases} \Rightarrow \vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = -\frac{qE}{m}t \\ v_z = 0 \end{cases} \Rightarrow \overrightarrow{OM} \begin{cases} x = v_0t \\ y = -\frac{1}{2}\frac{qE}{m}t^2 \\ z = 0 \end{cases}$$

On constate que $a_z = 0$, $v_z = 0$ et $z = 0$ le mouvement s'effectue dans le plan (xOy)

b. Equation cartésienne :

En éliminant t dans les équations : $\begin{cases} x = v_0t \\ y = -\frac{1}{2}\frac{qE}{m}t^2 \end{cases} x = v_0t \Rightarrow t = \frac{x}{v_0} \Rightarrow$

$$y = -\frac{1}{2} \frac{qE}{m} t^2 = -\frac{qE}{2m} \left(\frac{x}{v_0}\right)^2 = -\frac{qE}{2mv_0^2} x^2$$

Pour $0 \leq x < l$ où l est la longueur des plaques, $y = -\frac{qE}{2mv_0^2} x^2$, la trajectoire de la particule dans le champ est une parabole.

Pour un électron $q = -e \Rightarrow y = \frac{eE}{2mv_0^2} x^2$

c. Le point de sortie S du champ :

Les coordonnées du point de sortie S du champ sont :

$$S \begin{cases} x_s = l \\ y_s = -\frac{qEl^2}{2mv_0^2} = -\frac{eEl^2}{2mv_0^2} \text{ or } x_s = l = v_0 t \Rightarrow t = \frac{l}{v_0} \end{cases}$$

Les coordonnées du vecteur vitesse au point S sont :

$$\vec{v}_s \begin{cases} v_{sx} = v_0 \\ v_{sy} = -\frac{qE}{m} t = -\frac{qEl}{mv_0} = \frac{eEl}{mv_0} \end{cases}$$

Condition de sortie du champ : Il faut $y_s < \frac{d}{2}$ pour que la particule sorte du champ sans toucher les plaques.

3. La déviation angulaire et la déflexion électrique :

A la sortie des plaques, la particule n'est soumise à aucune force (son poids est négligeable)

$$\vec{E} = \vec{0} \Rightarrow \vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m} = \vec{0} \Rightarrow \vec{v} = \vec{cte} = \vec{v}_s.$$

Elle est animée d'un mouvement rectiligne uniforme de vecteur vitesse $\vec{v}_s$. Elle décrit un segment de droite SA dont la direction passe par le milieu I des plaques.

L'angle α entre la droite SA et l'axe Ox est appelé déviation angulaire. Fig. III 5.

$$\diamond \tan \alpha = \frac{SI}{IJ} = \frac{y_s}{l/2} = \frac{-\frac{qEl^2}{2mv_0^2}}{l/2} = -\frac{qEl}{mv_0^2}, \text{ pour l'électron } \tan \alpha = \frac{eEl}{mv_0^2}.$$

❖ La distance $AA' = D$ est appelée déflexion électrique ou déviation.

$$\tan \alpha = \frac{AA'}{L} = \frac{D}{L} \Rightarrow \frac{D}{L} = -\frac{qEl}{mv_0^2} \Rightarrow D = -\frac{qEL}{mv_0^2}$$

$$\text{En posant } E = \frac{U_{PP'}}{d} = \frac{U}{d} \Rightarrow D = -\frac{qULL}{mv_0^2 d}, D = -\frac{qLL}{mv_0^2 d} U = kU.$$

La déviation est proportionnelle à la tension appliquée entre les plaques.

$$\text{Pour un électron } AA' = D = \frac{eLL}{mv_0^2 d} U = kU \text{ avec } k = \frac{eLL}{mv_0^2 d}.$$

Remarque :

$$\text{Si } JA' = L \text{ alors } D = \frac{eL}{mv_0^2 d} \left(L + \frac{l}{2}\right) U;$$

$$\text{Si } OA' = L \text{ alors } D = \frac{eL}{mv_0^2 d} \left(L - \frac{l}{2}\right) U.$$

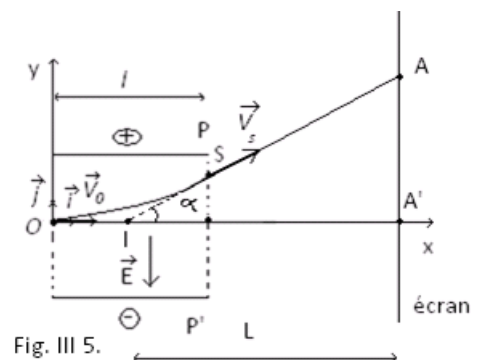


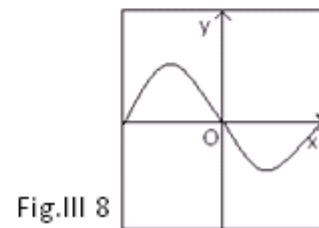
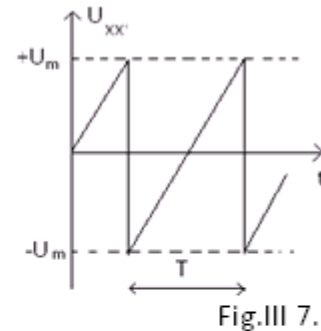
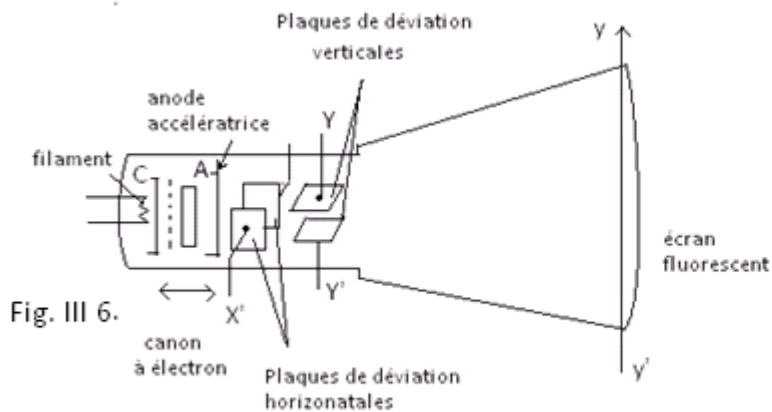
Fig. III 5.

III. Principe de l'oscilloscope :

Description : Le dispositif comprend :

- Un canon à électron qui émet et accélère les électrons ;
- Deux paires de plaques peuvent dévier verticalement ou horizontalement.
- Un écran sert à visualiser.

L'ensemble est placé dans un tube où on a fait le vide. Fig. III 6.



Fonctionnement :

Une tension appliquée entre les plaques horizontales Y et Y' provoque une déviation verticale du faisceau d'électron ; le spot (tache lumineuse) se déplace sur yy' d'une hauteur y proportionnelle à la tension $U_{YY'}$, $y = k \cdot U_{YY'}$.

Lorsque l'appareil a été étalonné, la mesure de y permet de mesurer la tension $U_{YY'}$: l'oscilloscope est alors un voltmètre.

De même, une tension $U_{XX'}$ appliquée entre les bornes X et X' des plaques verticales provoque un déplacement horizontal x proportionnelle à $U_{XX'}$. $x = k_1 U_{XX'}$.

Un dispositif incorporé à l'oscilloscope, appelé base de temps, produit une tension $U_{XX'}$ périodique en dent de scie, de période T . Sur une période T , la tension $U_{XX'}$ est proportionnelle au temps t $U_{XX'} = a \cdot t$. Le déplacement x du spot est $x = k_2 \cdot t$.

En l'absence de tension entre les plaques Y et Y' , le spot est animé d'un mouvement rectiligne uniforme horizontal suivant xx' . Fig. III 7.

La période de cette tension constitue la période de balayage : elle commande la vitesse de déplacement du spot.

En mode balayage, lorsque l'on applique une tension $U_{YY'}$, le spot décrit sur l'écran une courbe d'équations paramétriques $y = k \cdot U_{YY'}(t)$ et $x = k_2 \cdot t$. Cette courbe permet de suivre les variations de $U_{YY'}$ en fonction du temps t . Fig. III 8.

IV Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$

Classe : 12^{ème} SB et SE

Discipline : Physique

Objectif : L'élève doit être capable de :

- établir l'expression de la force de Lorentz ;
- déterminer les caractéristiques du mouvement ;
- établir les expressions du rayon de la trajectoire et de la période
- établir les expressions de la déviation et de la déflexion magnétique ;
- décrire le spectrographe de masse et citer quelques applications ;
- décrire le cyclotron et donner son principe de fonctionnement.

I. La force de Lorentz :

Une particule de charge q se déplaçant dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ avec une vitesse $\vec{v}$ subit l'action d'une force magnétique appelée force de Lorentz. Fig. IV 1.

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

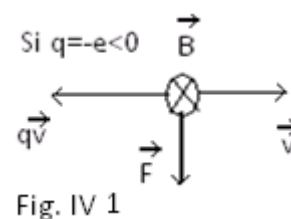
Les caractéristiques de cette force sont :

- direction : orthogonale à la fois à $\vec{v}$ et à $\vec{B}$ (donc au plan formé par $\vec{v}$ et $\vec{B}$) ;
- sens : Il est tel que $q\vec{v}$, $\vec{B}$ et $\vec{F}$ forment un trièdre direct ;
- intensité : sa valeur est $F = |q|vB\sin\alpha$, où $\alpha = (\vec{v}, \vec{B})$

Remarque : Si $\vec{v} // \vec{B} \Rightarrow \vec{v} \wedge \vec{B} = 0$ et $F = 0$. La particule n'est pas déviée.

Si $q > 0$ $q\vec{v}$ et $\vec{v}$ ont même sens ;

Si $q < 0$ $q\vec{v}$ et $\vec{v}$ sont de sens contraire.



II. Nature du mouvement : la vitesse initiale est orthogonale au champ $\vec{B}$.

1. Accélération du mouvement :

Soit $\vec{v}$ la vitesse de la particule à un instant quelconque, sa masse est m et sa charge est q .

Système : particule

Référentiel : terrestre supposé galiléen

Bilan des forces :

- le poids (dont les effets sont négligeables ;
- la force de Lorentz.

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a} \Rightarrow q\vec{v} \wedge \vec{B} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \frac{q\vec{v} \wedge \vec{B}}{m}$$

2. Etude cinématique :

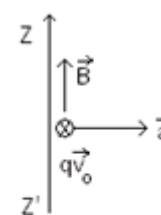
a. Planéité du mouvement :

Considérons un axe $Z'Z // \vec{B}$. La relation $\vec{a} = \frac{q\vec{v} \wedge \vec{B}}{m}$ montre que l'accélération est :

$$\vec{a} \perp \vec{B} \Rightarrow a_z = 0 \Rightarrow \frac{dv_z}{dt} = 0 \Rightarrow v_z = cte$$

En O à la date $t=0$ $\vec{v}_0 \perp \vec{B} \Rightarrow v_{0z} = 0 \Rightarrow v_z = v_{0z} = 0$.

Il n'y a pas de mouvement suivant $Z'Z$. La trajectoire de la particule est contenue dans un plan orthogonal à $\vec{B}$ et contenant $\vec{v}_0$ et $\vec{a}$ (ou $\vec{F}$). Fig. IV 2.



b. uniformité du mouvement :

Dans la base de Frenet $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n$

La relation $\vec{a} = \frac{q\vec{v} \wedge \vec{B}}{m}$ montre que $\vec{a} \perp \vec{v} \Rightarrow a_t = 0 \Rightarrow v = cte = v_0$ La valeur de la vitesse est constante, le mouvement est uniforme.

c. Nature de la trajectoire :

A chaque instant $\vec{v}$ est orthogonal à $\vec{B}$ $a = \frac{|q|vB}{m}$.

$$a_t = 0 \Rightarrow a = a_n = \frac{v^2}{R} \text{ où } R \text{ est le rayon de courbure de la trajectoire.}$$

Ainsi $\frac{v^2}{R} = \frac{|q|vB}{m} \Rightarrow R = \frac{mv}{|q|B}$ R est constante car m, v, B et $|q|$ sont constant, la trajectoire est un cercle de rayon $R = \frac{mv_0}{|q|B}$

d. Période de révolution :

Le mouvement est périodique. La période est la durée d'un tour. Sa valeur est :

$$T = \frac{2\pi R}{v} = 2\pi \frac{\frac{mv}{|q|B}}{v} \text{ on a } T = 2\pi \frac{m}{|q|B} \text{ Elle est indépendante de la vitesse.}$$

La vitesse angulaire est $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{|q|B}{m}$.

La fréquence est $f = \frac{1}{T} = \frac{|q|B}{2\pi m}$.

3. . Etude énergétique :

Au cours du mouvement, la force $\vec{F}$ reste constamment perpendiculaire à $\vec{v}$. La puissance de cette force est $P = \vec{F} \cdot \vec{v} = 0$ or $P = \frac{dE_C}{dt} = 0 \Rightarrow E_C = cte$, la force de Lorentz ne travaille pas.

4. Déviation et déflexion magnétique :

En pénétrant en O avec la vitesse $\vec{v}_0$ orthogonal à $\vec{B}$, les particules décrivent à vitesse constante un arc de cercle OS. A la sortie en S du champ, elle retrouve en l'absence d'actions notables, une trajectoire rectiligne.

L'angle entre la trajectoire rectiligne à la sortie du champ et le vecteur vitesse initiale est la déviation angulaire α .

Si $l \ll R$ (l petit devant R) la longueur de l'arc OS est voisine de l , $\widehat{OS} \approx l$.

$$\alpha = \frac{\widehat{OS}}{R} \approx \frac{l}{R} = \frac{l}{\frac{mv_0}{|q|B}} = \frac{|q|Bl}{mv_0}.$$

L'intersection I de la tangente ST' avec OT est voisine du milieu de $OA=l$ longueur du champ et si l'angle α est petit $\tan \alpha \approx \alpha$. $\tan \alpha = \frac{TT'}{IT}$. $TT'=D$, D est la déflexion magnétique correspondant à la distance entre le point d'impact de la particule sur l'écran et la direction de la vitesse à l'entrée du champ. Fig. IV 3.

$$\tan \alpha = \frac{TT'}{IT} = \frac{D}{L} \Rightarrow \frac{D}{L} = \frac{|q|Bl}{mv_0} \Rightarrow D = \frac{|q|Bl}{mv_0} L.$$

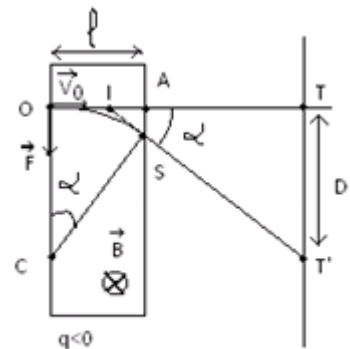


Fig. IV 3

Remarque : si la déviation angulaire est grande, le calcul précédent n'est valable qu'en première approximation.

Le quotient de la charge par la masse est appelée charge massique d'une particule.

$$\frac{|q|}{m} = \frac{Dv_0}{L l B}$$

III. Applications

1. Le spectrographe de masse :

a. Description : Un spectrographe (ou spectromètre) de masse comprend :

- une chambre d'ionisation **1** ;
- une chambre d'accélération : les ions sont soumis à un champ électrique **2**;
- une chambre de déviation **3**;
- un détecteur (plaque photographique ou compteur...) **4**.

b. Principe :

Un mélange d'isotopes d'un même élément chimique est placé dans une chambre d'ionisation. Les atomes des isotopes acquièrent par ionisation la même charge q mais ils n'ont pas la même masse. Les ions sont accélérés par une tension U maintenue entre les grilles P_1 et P_2 , puis éjectés dans une zone où règne un champ magnétique uniforme. Fig. IV 4.

Le théorème de l'énergie cinétique appliqué à chaque ion entre P_1 et P_2 , donne :

$$Ec_2 - Ec_1 = q \cdot U_{P_1 P_2} = q \cdot U$$

$$Ec_1 = 0 \text{ et } Ec_2 = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = q \cdot U \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

Le rayon de la trajectoire dans le champ magnétique est $R = \frac{mv}{|q|B}$.

$$R = \frac{m\sqrt{\frac{2qU}{m}}}{|q|B} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2Um}{q}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2U}{q}} \sqrt{m}.$$

Supposons que le mélange initial soit formé de deux isotopes de masse m_1 et m_2 avec $m_2 > m_1$.

On constate que $v_2 > v_1$ avec $v_1 = \sqrt{\frac{2qU}{m_1}}$ et $v_2 = \sqrt{\frac{2qU}{m_2}}$.

Aussi $R_2 > R_1$ avec $R_1 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2U}{q}} \sqrt{m_1}$ et $R_2 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2U}{q}} \sqrt{m_2}$.

Les isotopes peuvent être ainsi séparés.

La distance MP entre les points d'impact des deux types d'ions est $MP = D_2 - D_1 = 2R_2 - 2R_1$.

$$MP = \frac{2}{B} \sqrt{\frac{2U}{q}} \sqrt{m_2} - \frac{2}{B} \sqrt{\frac{2U}{q}} \sqrt{m_1} = \frac{2}{B} \sqrt{\frac{2U}{q}} (\sqrt{m_2} - \sqrt{m_1})$$

c. Utilisation : Aujourd'hui de nombreuses recherches en biologie, en géologie, en océanographie et en archéologie sont rendues possibles par l'emploi des spectromètres de masse.

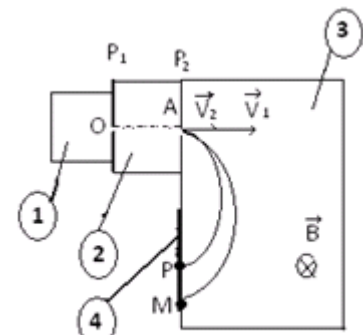


Fig. IV 4

2. Le cyclotron :

a. Description :

Le cyclotron est constitué de deux demi-cylindre de métal 'appelés dees) creux dans lequel on fait un vide. Ils sont placés dans un champ magnétique uniforme perpendiculaire au plan de la base.

Une tension alternative est appliquée au dees. Fig. IV 5.

b. Principe :

Une source d'ion est placée dans la région centrale. La tension alternative accélère rectilignement pendant une très courte durée. Les ions entrent ensuite dans un dee et décrivent un demi cercle. Quand ils sortent d'un dee, l'autre est devenu attracteur. A chaque demi-tour, ils acquièrent un supplément d'énergie $q.U_m$.

Comme la tension change de signe à chaque demi-tour, sa période T est égale à la durée d'un tour. Par suite la vitesse angulaire ω des ions est égale à la pulsation de la tension alternative. A la sortie des dees ($R=R_D$), la vitesse est maximale. R_D est le rayon des dees.

c. **Utilisation** : Le cyclotron est utilisé en radiothérapie et en physique nucléaire.

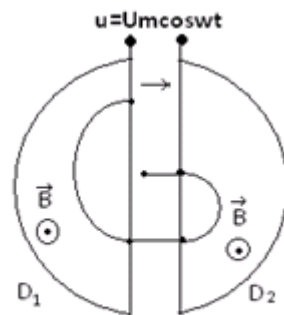


Fig. IV 5

V Satellites à trajectoire circulaire

Classe : 12^{ème} SB et SE

Discipline : Physique

Objectif : L'élève doit être capable de :

- définir un satellite ;
- déterminer la nature du mouvement d'un satellite ;
- établir l'expression de la vitesse d'un satellite ;
- définir la période de révolution et établir son expression ;
- définir un satellite géostationnaire ; établir la troisième loi de Kepler.

I. Mouvement du satellite :

1. Définition :

Un corps en orbite autour de la terre est appelé satellite terrestre. Dans le référentiel géocentrique les satellites décrivent des trajectoires elliptiques ou des trajectoires circulaires.

2. Nature du mouvement :

a. Accélération du centre d'inertie du satellite :

Etudions le mouvement d'un satellite en orbite circulaire autour de la Terre.

Système : satellite ;

Référentiel : géocentrique considéré comme galiléen ;

Bilan des forces : force de gravitation terrestre $\vec{F} = m\vec{g}$. $\vec{g}$ est le champ de gravitation.

$$\Sigma F_{ext} = m\vec{a} \Rightarrow m\vec{g} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \vec{g}$$

L'accélération du centre d'inertie du satellite est égale au champ gravitationnel. Elle est indépendante de la masse du satellite.

L'expression du champ est :

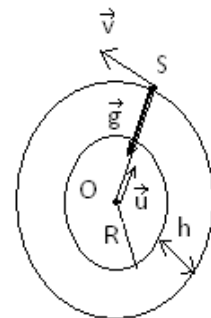
$$\vec{g} = -G \frac{M}{r^2} \vec{u} \text{ où } r = OS = R + h ;$$

r est le rayon de l'orbite, R le rayon de la Terre ;

h l'altitude du satellite ; M la masse de la Terre ; $\vec{u}$ le vecteur unitaire ;

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} SI$ la constante de gravitation.

L'accélération étant centripète $\vec{a} \perp \vec{v}$, la trajectoire d'un satellite est située dans le plan $(\vec{a}, \vec{v})$ qui passe par le centre O de la Terre. Fig. V 1.



b. Uniformité du mouvement :

Dans la base de Frenet $(\vec{t}, \vec{n})$ l'accélération est : $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n$

Or $\vec{a} = \vec{g}$ et $\vec{g}$ est centripète, par conséquent les coordonnées de l'accélération sont :

$$\vec{a} \begin{cases} a_t = \frac{dv}{dt} = 0 \\ a_n = g = \frac{v^2}{r} \end{cases}, a_t = \frac{dv}{dt} = 0 \Rightarrow v = cte.$$

Donc la valeur de la vitesse est constante, le mouvement du satellite est uniforme.

c. Expression de la vitesse :

Puisse que l'accélération tangentielle est nulle $a_t = 0$, $a = a_n = \frac{v^2}{r} \Rightarrow g = \frac{v^2}{r}$

$$G \frac{M}{r^2} = \frac{v^2}{r} \Rightarrow v^2 = \frac{GM}{r} \text{ et } v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

La vitesse du satellite peut s'exprimer en fonction de son altitude h , du rayon R de la Terre et de la valeur g_0 du champ au sol.

$$g = \frac{GM}{r^2} = \frac{GM}{(R+h)^2}, \text{ au sol } h=0 \text{ } g \text{ devient } g_0 = \frac{GM}{R^2} \Rightarrow GM = g_0 R^2$$

$$\text{Ainsi } v = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{GM}{R+h}} = \sqrt{\frac{g_0 R^2}{R+h}}$$

La vitesse du satellite diminue avec l'altitude. Elle est indépendante de la masse du satellite.

3. Période de révolution :

La période est la durée d'un tour.

$$\text{Elle est donnée par } T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{GM}{r}}} = 2\pi r \cdot \sqrt{\frac{r}{GM}} \text{ ou } T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

En tenant compte du fait que $GM = g_0 R^2$ on peut obtenir la période en fonction de la valeur du champ au sol.

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{r^3}{GM}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(R+h)^3}{GM}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(R+h)^3}{g_0 R^2}}$$

La période augmente avec l'altitude.

II. Satellite géostationnaire :

1. **Définition** : un satellite géostationnaire est un satellite qui reste fixe pour un observateur terrestre.

Dans le référentiel géocentrique, un satellite géostationnaire décrit comme tous les points de la Terre et avec la même vitesse angulaire, un cercle perpendiculaire aux pôles.

Ses caractéristiques sont :

- le plan de la trajectoire : plan équatorial ;
- période de révolution : 1 jour sidéral soit $T=86164s=23h56min04s$;
- l'altitude est environ 36000km.

2. Calcul de l'altitude :

La période étant connue :

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(R+h)^3}{GM}} \Rightarrow T^2 = 4\pi^2 \frac{(R+h)^3}{GM} \Rightarrow \frac{(R+h)^3}{GM} = \frac{T^2}{4\pi^2} \Rightarrow (R+h)^3 = \frac{T^2 GM}{4\pi^2}$$

$$\text{Ainsi } R + h = \sqrt[3]{\frac{T^2 GM}{4\pi^2}} \Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{T^2 GM}{4\pi^2}} - R$$

Application numérique : $T=86164s$, $R= 6400km$ et $M=6.10^{24}kg$.

$$h = \sqrt[3]{\frac{T^2 GM}{4\pi^2}} - R = \sqrt[3]{\frac{86164^2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{4\pi^2}} - 6,4 \cdot 10^6 = 3,58 \cdot 10^7 m$$

III. Troisième loi de Kepler :

La relation $T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{r^3}{GM}}$ permet d'écrire :

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{r^3}{GM} \Rightarrow \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM} = \text{cte} \text{ ou } \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{g_0 R^2} = \text{cte}$$

Le rapport $\frac{T^2}{r^3} = \text{cte}$ est constant et indépendant de la masse du satellite. Il ne dépend que de la masse M de la Terre responsable de l'attraction gravitationnelle.

Ce résultat constitue la troisième loi de Kepler.

Application : pour deux satellites S_1 et S_2 tournant autour de la Terre la troisième loi de Kepler permet d'écrire :

$$\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{T_2^2}{r_2^3}$$

où T_1 et T_2 les périodes respectives de S_1 et S_2 et r_1 et r_2 les rayons de leur orbite.

IV. Applications :

Les satellites artificiels sont utilisés pour la télécommunication, la météorologie, l'observation de la Terre et de l'espace, la cartographie, le GPS (global positioning system).

Remarque : la lune est un satellite naturel de la Terre.

Chapitre 2 : ÉNERGIE

I Énergie potentielle Énergie mécanique

Classe 12^{ème} SE

Discipline : Physique

Objectifs : L'élève doit être capable de :

- définir les énergies potentielles de pesanteur ;
- donner les expressions des énergies potentielles de pesanteur et élastique ;
- définir l'énergie mécanique et donner son expression ;
- définir une force conservative et une force non conservative ;
- énoncer la loi de conservation de l'énergie mécanique ;
- énoncer la loi de non conservation de l'énergie mécanique.

I. Énergie potentielle :**1. Énergie potentielle de pesanteur :****a. Définition :**

L'énergie potentielle de pesanteur est l'énergie que possède un solide du fait de sa position dans le champ de pesanteur.

b. Expression :

Si l'on déplace un solide S par rapport au sol en le faisant passer de l'altitude Z_1 à l'altitude Z_2 par un chemin quelconque, le travail du poids est $W_{\vec{P}} = P \cdot h = mg \cdot h$

$$h = Z_1 - Z_2 \Rightarrow W_{\vec{P}} = mg(Z_1 - Z_2) = mgZ_1 - mgZ_2$$

En posant $E_{p_1} = mgZ_1$ et $E_{p_2} = mgZ_2$. Nous définissons une grandeur: **$E_p = mgz$** .

Cette grandeur s'appelle énergie potentielle de pesanteur du système formé par le solide et la Terre.

L'expression générale de l'énergie potentielle de pesanteur est : $E_p = mgz + C$

z est l'altitude du centre d'inertie du solide sur un axe orienté vers le haut

C est une constante qui est déterminée par la position de référence.

La position de référence z_0 est l'altitude pour laquelle $E_p = 0$. Fig. I 1.

En choisissant comme position de référence $z_0 = 0$, l'énergie potentielle s'écrit :

$$\boxed{E_p = mgz}$$

E_p peut être positive ou négative : si $z > 0$, $E_p > 0$ et si $z < 0$ alors $E_p < 0$.

2. Énergie élastique :**a. Définition :**

L'énergie potentielle élastique est l'énergie d'un corps ayant subi une déformation élastique.

b. Expression :

- En choisissant comme position de référence la position d'abscisse $x=0$, l'énergie potentielle élastique du pendule élastique est donnée par : $\boxed{E_p = \frac{1}{2} kx^2}$ k est la raideur du ressort. Fig. I 2.

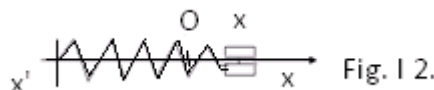


Fig. I 2.

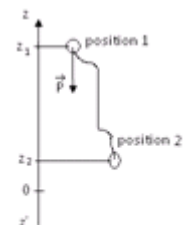


Fig. I 1.

- En choisissant comme position de référence la position d'abscisse $\theta=0$, l'énergie potentielle élastique du pendule de torsion est donnée par :

$$E_P = \frac{1}{2} C \theta^2 \quad \text{où } C \text{ est la constante de torsion du fil. Fig. I 3.}$$

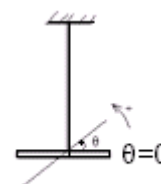


Fig I 3.

3. Énergie potentielle électrostatique :

L'énergie potentielle électrostatique d'une particule chargée dans un champ électrique est :

$$E_P = q \cdot V + C, \quad V \text{ étant le potentiel correspondant à la position de la particule chargée.}$$

Dans l'état de référence, l'énergie potentielle est nulle et si l'état de référence correspond au potentiel nul, l'expression de l'énergie potentielle se simplifie :

$$E_P = q \cdot V.$$

II. Énergie mécanique :

1. Définitions :

- a. **Énergie mécanique** : l'énergie mécanique d'un solide est à chaque instant, dans un repère donné la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle à cet instant.

$$E = E_c + E_P$$

- b. **Force conservative** : Une force est conservative si son travail ne dépend pas du chemin suivi.
Ex : poids, forces électrostatiques, forces élastiques des ressorts.

Une énergie potentielle est associée à une force conservative. Seules les variations d'énergie potentielle sont parfaitement définies.

Lorsqu'un solide est soumis à plusieurs forces conservatives, son énergie potentielle est alors la somme des énergies potentielles relatives à chacune de ces forces.

- c. **Force non conservative** : Une force est non conservative si son travail dépend du chemin suivi.
Ex : les forces de frottements.

2. Conservation de l'énergie mécanique :

L'énergie mécanique d'un solide soumis uniquement à des forces conservatives est constant :

$$E = E_c + E_P = \text{Cte}$$

3. Non Conservation de l'énergie mécanique :

La variation de l'énergie mécanique d'un solide entre deux instants donnés est égale à la somme des travaux des forces non conservatives entre ces deux instants.

$$\Delta E = E_2 - E_1 = W_{\text{forces non conservatives}}$$

Si les seules forces conservatives sont des frottements, l'énergie mécanique ne peut que diminuer.

II Énergie interne : premier principe de la thermodynamique

Classe : 12^{ème} SE

Discipline : Physique

Objectif :

- Définir l'énergie interne d'un système ;
- Expliquer une transformation cyclique ;
- définir la thermodynamique ;
- énoncer le premier principe de la thermodynamique.

1. Énergie interne :

Définition :

On appelle énergie interne U l'énergie d'un système qui dépend uniquement de son état.

Soit un système passant d'un état initial I à un état final F à la suite d'une transformation au cours de laquelle il n'échange avec le milieu extérieur que de la chaleur Q et du travail W .

Conventionnellement :

- ❖ un travail reçu est positif $W > 0$ et une quantité de chaleur reçue est positive $Q > 0$.
- ❖ un travail fourni est négatif $W < 0$ et une quantité de chaleur cédée est négative $Q < 0$.
 - Si $W + Q > 0$, l'énergie interne du système augmente, le système reçoit plus d'énergie du milieu extérieur ;
 - Si $W + Q < 0$, l'énergie interne du système diminue, le système fournit plus d'énergie au milieu extérieur.

La variation de l'énergie interne du système dans les deux cas est: $\Delta U = U_F - U_I = W + Q$.

2. Transformation cyclique :

On dit qu'un système subit un cycle de transformation quand au terme de celle-ci, le système reprend exactement son état initial.

Ainsi $U_F = U_I \Rightarrow \Delta U = 0 \Rightarrow W + Q = 0 \Rightarrow W = -Q$

Principe de l'équivalence :

Lorsqu'un système décrit un cycle de transformation au cours duquel il n'échange avec l'extérieur que du travail et de la chaleur :

- S'il reçoit du travail ($W > 0$), il fournit de la chaleur ($Q < 0$).
- S'il fournit du travail ($W < 0$), il reçoit de la chaleur ($Q > 0$).

Les quantités de chaleur échangées avec le milieu extérieur sont dans tous les cas égales en valeur absolue.

3. La thermodynamique :

a. Définition :

La thermodynamique est l'étude des propriétés d'un système de corps par analyse des transformations d'énergie se produisant dans le système.

b. Premier principe de la thermodynamique : principe de l'état initial et l'état final.

Dans toute transformation au cours de laquelle un système n'échange avec le milieu extérieur que du travail et de la chaleur, la somme algébrique des travaux et des quantités de chaleur reçue ne dépend que de l'état initial et de l'état final.

III La calorimétrie

Classe : 12^{ème} SE

Discipline : Physique

Objectifs :

- donner des exemples de transformation mutuelle de l'énergie mécanique et de la chaleur ;
- définir la calorimétrie ;
- définir une enceinte adiabatique ;
- définir la chaleur, la chaleur massique, la capacité calorifique, la valeur en eau d'un calorimètre ;
- définir la chaleur latente de changement d'état et donner son expression,
- calculer la quantité de chaleur reçue ou cédée par un corps.

I. La transformation du travail en chaleur et la transformation inverse :

Si on fournit du travail à un système pour vaincre les forces de frottements, le système s'échauffe et produit de la chaleur.

Inversement un moteur thermique transforme de la chaleur en travail.

II. Calorimétrie :

1. Définitions :

a. La chaleur : la chaleur est une forme d'énergie appelée énergie thermique.

L'unité de la quantité de chaleur est le joule (J).

b. La calorimétrie : la calorimétrie est la mesure des quantités de chaleur.

Un échange de chaleur entre deux corps a toujours lieu spontanément du corps chaud vers le corps froid.

Deux corps à la même température n'échange pas globalement de chaleur. Ils sont en équilibre thermique.

Lorsqu'un corps reçoit ou perd de la chaleur, il se produit :

- soit une variation de sa température ;
- soit à température constante, un changement d'état physique.

c. Enceinte adiabatique :

Une enceinte adiabatique est une enceinte dont la paroi est imperméable à la chaleur.

Une telle enceinte est réalisée approximativement par un calorimètre.

Tout calorimètre comporte un vase que l'on isole thermiquement de l'extérieur. On l'utilise avec des accessoires (thermomètre, agitateur...).

2. grandeurs calorimétriques :

a. Capacité calorifique ou thermique :

La capacité calorifique ou thermique μ d'un corps est la quantité de chaleur qu'il faut fournir au corps pour l'échauffer de 1°C. Son unité est J.k⁻¹ ou J.°C⁻¹.

Si un corps reçoit la quantité de chaleur Q pour s'échauffer de la température t_i à la

température t_f sans changer d'état physique : $\mu = \frac{Q}{t_f - t_i}$.

Si un système est formé de n corps de capacité thermique $\mu_1, \mu_2 \dots \mu_n$. la capacité thermique du système est $\mu = \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n$ ou encore $\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i$.

b. Chaleur massique :

La chaleur massique c d'un corps homogène représente la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse du corps pour augmenter sa température de 1°C . L'unité de la chaleur massique est : $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ou $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Si un corps homogène de masse m reçoit la quantité de chaleur Q pour s'échauffer de la température t_i à la température t_f sans changer d'état physique : $c = \frac{Q}{m(t_f - t_i)}$.

Un corps homogène de masse m et de chaleur massique c a une capacité thermique :

$$\mu = m \cdot c$$

c. Valeur en eau d'un calorimètre : la valeur en eau d'un calorimètre et de ses accessoires est la masse de la quantité d'eau dont la capacité thermique est égale à celle du calorimètre et de ses accessoires. $\mu = m \cdot c_e$. μ est la capacité calorifique du calorimètre et de ses accessoires, c_e la chaleur massique de l'eau, m est alors la valeur en eau du calorimètre.

d. Chaleur latente : la chaleur latente d'un changement d'état est la quantité de chaleur reçue ou cédée par l'unité de masse de ce corps pur lors de ce changement d'état.

Q étant la quantité de chaleur reçue ou cédée par une masse m du corps pur lors du changement d'état, la chaleur latente de ce changement d'état est :

$$L = \frac{Q}{m} \text{ où est en } \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Pour un corps pur donné, sous une pression donnée, les chaleurs latentes pour deux changements d'état inverses sont égales.

Exemple : pour l'eau à 0°C $L_{\text{solidification}} = L_{\text{fusion}} = 334 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

3. Quantité de chaleur :**a. Variation de température sans changement d'état :**

Lorsque la température d'un corps, s'élève de t_i à t_f , il reçoit la quantité de chaleur :

- si la capacité calorifique du corps est μ : $Q = \mu(t_f - t_i)$;
- si la chaleur massique du corps de masse m est c : $Q = m \cdot c(t_f - t_i)$.

Inversement lorsque la température d'un corps, s'abaisse de t_i à t_f , il cède la quantité de chaleur :

- si la capacité calorifique du corps est μ : $Q = \mu(t_i - t_f)$;
- si la chaleur massique du corps de masse m est c : $Q = m \cdot c(t_i - t_f)$.

b. Changement d'état physique à température fixe :

Le changement d'état physique d'un corps pur, bien que s'effectuant à température constante, nécessite un échange de chaleur avec le milieu extérieur.

Le corps pur absorbe de la chaleur lorsqu'il passe d'un état condensé à un état moins condensé : (*solide* $\rightarrow$ *liquide* ; *liquide* $\rightarrow$ *gaz*; *solide* $\rightarrow$ *gaz*).

Au contraire il cède de la chaleur au milieu extérieur dans le cas inverse.

La quantité de chaleur reçue ou cédée est : $Q = mL$.

La chaleur latente de changement d'état est alors : $L = \frac{Q}{m}$.

4. Mesures calorimétrique : méthode des mélanges

De façon générale, si l'on place dans une enceinte adiabatique n corps à des températures initiales différentes, ils finissent par prendre tous la même température après avoir échangé eux de la chaleur. Il y a équilibre thermique.

Dans l'hypothèse où les corps n'échangent de l'énergie entre eux que sous forme de chaleur, la conservation de l'énergie impose que la somme des quantités de chaleur reçues par certains corps, soit égale à la somme des quantités de chaleur cédées par les autres :

$$\sum q_{reçue} = \sum q_{cédée}.$$

En utilisant les valeurs algébriques des quantités de chaleur : la somme algébrique des quantités de chaleur échangées est nulle :

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0.$$

	Substance	Chaleur massique (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
solides	Aluminium	0,888
	Cuivre	0,388
	Fer	0,460
	Plomb	0,129
	Zinc	0,393
	Verre Pyrex	0,840
	Glace	2,10
liquides	Benzène	1,83
	Eau	4,18
	Éthanol	2,48
	Glycérine	2,42
	Mercure	0,149

Corps pur	chaleur latente de fusion (kJ/kg) sous pression normale	chaleur latente de vaporisation (kJ/kg) sous pression normale
Hélium	5,2	20,9
Eau	334	2257
Sodium	114	4380
Mercure	11,5	296
Benzène	125	395

Chapitre 3 : I INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Classe : 12^{ème} SE et SB

Discipline : Physique

Objectifs :

- définir le flux magnétique et donner son expression ;
- décrire une expérience de mise en évidence du phénomène d'induction électromagnétique ;
- interpréter le phénomène électromagnétique ;
- définir l'induction électromagnétique ;
- énoncer la loi de Lenz ;
- définir un champ électromoteur et donner son expression ;
- donner les expressions des f.é.m. induites moyenne et instantanée ;
- donner le sens du courant induit ;
- écrire les expressions des intensités moyenne et instantanée ;
- écrire l'expression de la quantité d'électricité induite ;
- définir un alternateur, un transformateur ;
- décrire un alternateur, un transformateur ;
- expliquer le principe de fonctionnement d'un alternateur, d'un transformateur.

I. Flux magnétique :

1. Définition :

Le flux d'un champ magnétique à travers une surface est défini par : $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$.

2. Expressions :

Si le circuit est formé de N spires identiques bobinées dans le même sens, le flux total est : $\Phi = N\vec{B} \cdot \vec{S} = NBS\cos\alpha$ où $\alpha = (\vec{B}, \vec{S})$. $\vec{S} = S \cdot \vec{n}$ est le vecteur surface et $\vec{n}$ est le vecteur normal.

Pour déterminer le sens de $\vec{n}$, on oriente le circuit de façon arbitraire.

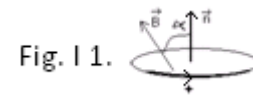
La règle de la main droite donne le sens $\vec{n}$. Fig. I 1.

Pour une spire $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS\cos\alpha$.

L'unité SI du flux magnétique est le Weber (Wb).

La valeur du flux caractérise le nombre de lignes de champ traversant un circuit.

La variation du flux magnétique à travers un circuit peut résulter d'une variation du vecteur champ (en grandeur ou direction), d'une variation du vecteur surface (en grandeur, ou en direction) ou encore des variations simultanées de ces deux grandeurs vectorielles.



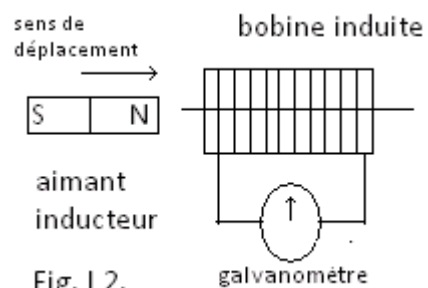
II. Induction électromagnétique :

1. Mise en évidence :

Formons un circuit conducteur avec une bobine et un galvanomètre. Ce circuit ne comporte pas de générateur.

Expérience I : Fig. I 2.

- Approchons rapidement de la bobine, le pôle d'un aimant. Nous observons une déviation temporaire de l'aiguille du galvanomètre : pendant le mouvement de



l'aimant, il circule un courant électrique. Ce courant, créé dans la bobine bien qu'elle ne soit pas reliée à un générateur est appelé courant induit.

- Immobilisons à n'importe quelle position l'aimant : l'aiguille du galvanomètre ne bouge pas, aucun courant ne circule.
- Immobilisons l'aimant et approchons la bobine, un courant apparaît dans la bobine.

Conclusion : Le courant n'apparaît que lors du déplacement relatif de l'aimant par rapport à la bobine.

Expérience II : Fig. I 3.

Remplaçons dans l'expérience précédente l'aimant par une bobine parcourue par un courant dont on peut faire varier l'intensité, à l'aide d'un rhéostat par exemple. Pendant la variation du courant, le galvanomètre indique le passage d'un courant dans l'autre bobine.

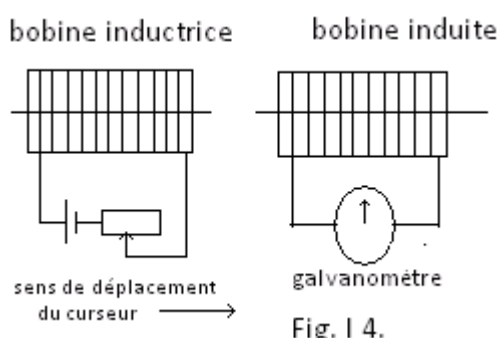


Fig. I 4.

Expérience III : Fig. I 5.

Si nous prenons un circuit ouvert, il ne peut pas y avoir de courant induit. Un voltmètre branché aux bornes de la bobine montre l'existence d'une tension lorsqu'on approche un aimant.

2. Interprétation :

Dans toutes ces expériences, l'apparition du courant ou de la tension dans la bobine est due à une variation du flux magnétique dans la bobine :

- Le déplacement de l'aimant entraîne une variation du flux.
- Aussi le champ créé par un solénoïde est proportionnelle à l'intensité du courant qui le traverse, une variation de l'intensité du courant entraîne une variation du flux magnétique.

Le flux de champ magnétique, dont les variations provoquent l'apparition d'un courant induit dans le circuit fermé est appelée **flux inducteur**.

La source de champ magnétique qui crée ce flux est l'**inducteur**. Le circuit dans lequel on observe le courant induit est l'**induit**.

3. Définition :

Toute variation de flux magnétique inducteur à travers un circuit provoque l'apparition dans celui-ci d'une force électromotrice (f.é.m.) induite e . Ce phénomène est appelé phénomène d'induction magnétique.

Le circuit est équivalent à un générateur de f.é.m. e :

- s'il est ouvert, la tension entre ses bornes est égale à la f.é.m. e ;
- s'il est fermé, la f.é.m. induite provoque la circulation d'un courant induit.

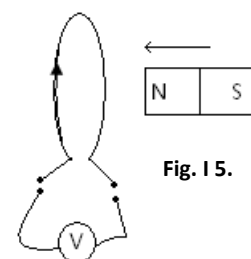


Fig. I 5.

4. Loi de Lenz :

Le sens du courant induit est tel que, par ses effets électromagnétiques, il s'oppose à la cause qui lui a donné naissance.

5. F.é.m. induite :**a. F.é.m. induite :**

La f.é.m. moyenne est donnée par : $E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, où $\Delta\Phi = \Phi_{final} - \Phi_{initial} = \Phi_2 - \Phi_1$ est la variation du flux inducteur et $\Delta t = t_2 - t_1$ est la durée de cette variation.

b. F.é.m. induite instantanée :

La f.é.m. instantanée est $e = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} E = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

On a donc : $e = -\frac{d\Phi}{dt}$.

La f.é.m. d'induction est l'opposé de la dérivée par rapport au temps du flux inducteur à travers le circuit. Cette loi est connue sous le nom de loi de Faraday. Le signe moins traduit la loi de Lenz.

6. Courant induit :

Un courant induit ne prend naissance que lorsque le circuit est fermé.

Soit R la résistance totale du circuit, la tension à ses bornes étant nulle, $u = Ri - e = 0$, et

$$i = \frac{e}{R} \text{ ou } i = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt} \text{ ; } i \text{ en A ; } e \text{ en V et } R \text{ en } \Omega.$$

Le courant et la f.é.m. ont même signe.

7. Quantité d'électricité :

La quantité d'électricité induite circulant dans le circuit entre t_1 et t_2 est : $Q = \frac{|\Delta\Phi|}{R}$, Q est en coulomb.

8. Déplacement d'une tige dans un champ magnétique uniforme : champ électromoteur.**a. Expérience : Fig. 6.**

Deux rails parallèles, conducteurs horizontaux sont reliés par un galvanomètre sensible et supportent une tige T conductrice de longueur l . L'ensemble est placé dans un magnétique uniforme. Le circuit est orienté de que le flux inducteur soit positif. Lorsque la

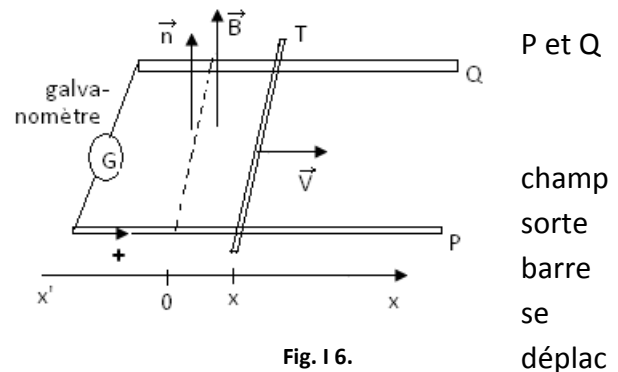


Fig. I 6.

P et Q
champ
sorte
barre
se
déplac

e, le galvanomètre indique le passage d'un courant induit.

A la date $t=0$, la barre est en O.

A la date t , l'abscisse de la barre est x , sa vitesse à cet instant est $v = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$.

Le flux magnétique à cet instant est $= \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \alpha$, $\alpha = (\vec{B}, \vec{n}) = 0$.

On a donc $\Phi = BS = Blx$

La f.é.m. induite est $e = -\frac{d\Phi}{dt} = -Bl \frac{dx}{dt}$. D'où $e = -Blv$

Champ électromoteur $\vec{E}_M$:

Dans le cas où le circuit se déplace, le courant induit résulte du déplacement des porteurs de charges (électrons) mobiles sous l'action de la force de Lorentz $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$.

Or dans son propre référentiel, l'électron est immobile, tout se passe comme s'il était soumis à l'action d'un champ électrique

$\vec{E}_M$. Ce champ est appelé champ électromoteur.

Le champ électromoteur a le sens du courant induit.

Le sens du courant induit vérifie la loi de Lenz.

Si le circuit est ouvert, les charges négatives s'accumulent en N et M se charge positivement.

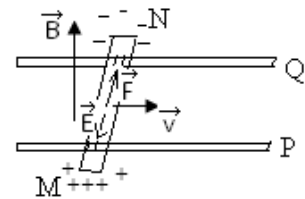


Fig. I 7.

b. Définition :

Lors d'un phénomène d'induction, les électrons sont mis en mouvement dans l'induit par un champ électrique appelé champ électromoteur.

c. Expression :

La force de Lorentz correspond à la force électrique : d'où $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B} = q\vec{E}_M$.

$q\vec{v} \wedge \vec{B} = q\vec{E}_M \Rightarrow \vec{E}_M = \vec{v} \wedge \vec{B}$, sa norme est : $E_M = v \cdot B$.

III. Applications :**1. Alternateur : Fig. I 8.**

a. Définition : Les alternateurs sont des générateurs de courant alternatifs. Ils reçoivent de l'énergie mécanique et fournissent de l'énergie électrique.

b. Principe : En tournant devant des bobines en série, fixées sur le stator, des électro-aimants montés sur un rotor induisent une f.é.m. alternative dans les bobines de l'induit.

c. Fonctionnement: le rotor est mis en mouvement par une chute d'eau (centrales hydraulique), ou par une turbine à vapeur (centrale thermique).

Le sens des enroulements des bobines en série du rotor sont réalisés pour qu'il se forme des extrémités successivement nord et sud sur les pièces polaires. Ces bobines sont alimentées par un dispositif excitateur à balais frotteurs.

Le sens des enroulements des bobines fixes, voisines du stator, sont

inversés. Ainsi, toutes les f.é.m. s'ajoutent.

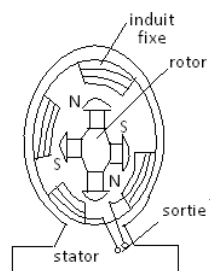


Fig. I 8.

2. Transformateur : Fig. 9.

a. Définition : Les transformateurs sont des appareils qui ont pour but de modifier les amplitudes des grandeurs électriques alternatives : ils transforment des signaux tensions et courants de fréquence f en signaux de même fréquence mais d'amplitudes différentes.

b. Description : Deux bobines sans aucun lien électrique entre elles sont enroulées autour d'une carcasse ferromagnétique refermée sur elle-même. Elle comporte n_1 et n_2 spires.

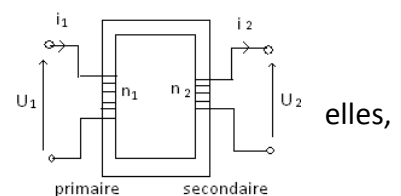


Fig. I 9

c. Principe de fonctionnement : Une tension sinusoïdale u_1 de valeur maximale U_1 , est appliquée aux bornes de l'une des bobines, appelée primaire du transformateur. Cela induit un champ magnétique alternatif dans la carcasse de fer, où il se trouve canalisé.

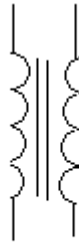
Les variations de flux au niveau de l'autre bobine, appelée secondaire du transformateur, y induisent une f.é.m. sinusoïdale e_2 , d'où une tension sinusoïdale u_2 aux bornes du secondaire, de valeur maximale U_2 .

Lorsque le transformateur est en fonctionnement, des courants sinusoïdaux d'intensité i_1 et i_2 (de valeurs maximales I_1 et I_2) passent dans le primaire et le secondaire. Les grandeurs précédentes sont liées par la relation :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ le rapport } \frac{n_2}{n_1} \text{ est appelé rapport (ou coefficient) de transformation.}$$

- Si $U_2 > U_1$ le transformateur est un élévateur de tension ;
- Si $U_2 < U_1$ le transformateur est un abaisseur de tension ;
- Si $U_2 = U_1$ le transformateur est un transformateur d'isolement.

Le transformateur représenté symboliquement par : Fig. I 10.



représentation
symbolique
Fig. I 10.

II AUTO-INDUCTION

Classe : 12^{ème} SE, SB

Discipline : Physique

Objectif :

- décrire une expérience de mise en évidence du phénomène d'auto-induction ;
- définir le flux propre à travers une bobine et donner son expression ;
- interpréter le phénomène d'auto-induction ;
- définir le coefficient d'auto-induction et donner son expression ;
- établir l'expression de l'auto-inductance pour un solénoïde sans noyau de fer doux ;
- donner l'expression de la f.é.m. d'auto-induction ;
- écrire l'expression de la d.d.p. aux bornes d'une bobine ;
- écrire l'expression de l'énergie magnétique dans une bobine.

I. Mise en évidence :

1. Expérience : Fig. II 1.

Un générateur alimente deux dérivations :

- l'une contient une bobine à noyau de fer doux et une lampe à inductance L_1 ;
- l'autre est constituée par un rhéostat et une lampe L_2 , identique à la précédente.

La résistance du rhéostat est ajustée pour que les deux lampes brillent du même éclat quand le courant passe en régime permanent, sa résistance est alors égale à celle de la bobine.

A la fermeture de l'interrupteur, la lampe L_2 brille instantanément, mais la lampe L_1 ne s'allume que progressivement.

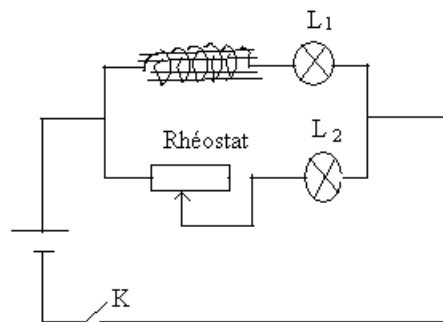


Fig. II 1

2. Interprétation :

Quand le courant apparaît dans la bobine, un courant auto-induit prend naissance, ce courant s'oppose à l'augmentation du courant dans le circuit selon la loi de Lenz. Le courant finit par s'établir, mais plus lentement que dans l'autre branche où aucun effet d'induction ne se manifeste.

- 3. Définition :** le phénomène d'auto-induction consiste en l'apparition d'une f.é.m. induite $\mathcal{e}$ liée à la variation du champ (flux) magnétique propre dans le circuit.

II. Flux propre à travers une bobine :

1. Flux propre :

a. Définition :

Une bobine parcouru par un courant crée un champ magnétique à travers elle-même. Ce flux est appelé flux propre.

b. Expression :

En l'absence de toute substance ferromagnétique, le flux propre Φ_p est proportionnel à l'intensité du courant qui traverse le circuit : $\Phi_p = L \cdot i$

Où Φ_p est en Wb ; i en Ampère (A) et L en Henry (H). L est l'auto-inductance du circuit.

2. Coefficient d'auto-inductance :

Définition : le coefficient d'auto-inductance ou inductance est le coefficient de proportionnalité entre le flux propre à travers un circuit et l'intensité du courant qui traverse ce circuit. Il est noté L et s'exprime en Henry (H).

Cas d'un solénoïde :

Le flux propre à travers un solénoïde formé de N spires est $\Phi = N \cdot \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$, avec $\alpha = (\vec{B}, \vec{S})$

En orientant le solénoïde dans le sens du champ $\alpha = (\vec{B}, \vec{S}) = 0$ $\Phi = B \cdot S$.

Pour un solénoïde $B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{l} I$. n est le nombre de spires par mètre de longueur et l est la longueur du solénoïde.

Ainsi flux propre est $\Phi = NB \cdot S = N \mu_0 \frac{N}{l} I S$.

Le coefficient d'auto-inductance du solénoïde est : $L = \frac{\Phi}{I} = \frac{N \mu_0 \frac{N}{l} I S}{I} = \mu_0 \frac{N^2}{l} S$

$$\boxed{L = \mu_0 \frac{N^2}{l} S}, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ SI}. S \text{ est la surface d'une spire.}$$

F.é.m. d'auto-induction:

Une variation de l'intensité du courant dans un circuit d'inductance L entraîne une variation du flux propre $\Phi = Li$. Une f.é.m. auto induite apparaît dans le circuit.

Son expression est $e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(Li)}{dt} = -L \frac{di}{dt}$

$$\boxed{e = -L \frac{di}{dt}}, \text{ avec } e \text{ en volt(V).}$$

3. D.d.p. aux bornes d'une bobine :

Une bobine est caractérisée par sa résistance R et son inductance L . La bobine est représentée par : Fig. II 2.

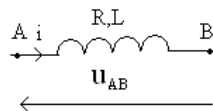


Fig. II 2

La résistance est :

$$\boxed{R = \rho \frac{l_1}{s}},$$

ρ est la résistivité du conducteur, l_1 la longueur du fil et s la section du fil.

La bobine étant orientée de A vers B, la tension u_{AB} entre ses bornes est :

$$u_{AB} = R \cdot i - e, e = -L \frac{di}{dt} \Rightarrow u_{AB} = R \cdot i - \left(-L \frac{di}{dt}\right) = Ri + L \frac{di}{dt}$$

$$u_{AB} = Ri + L \frac{di}{dt}$$

En régime continu, après l'établissement du régime permanent, l'intensité du courant est constante

$i=I$. En conséquence $\frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow u_{AB} = RI$. La bobine se comporte comme un conducteur ohmique.

L'effet inductif ne se manifeste qu'en régime variable, c'est-à-dire lorsque i varie au cours du temps.

En régime continu, l'effet inductif ne se manifeste qu'à l'ouverture et à la fermeture du circuit.

Lorsque la résistance de la bobine est négligeable $u_{AB} = L \frac{di}{dt}$.

4. Energie magnétique :

L'énergie électromagnétique emmagasinée dans une bobine est donnée par la formule :

$$E = \frac{1}{2} Li^2.$$

E en joule (J), L en Henry (H) et i en Ampère (A).

Chapitre 4 : Oscillateurs libres

I Oscillateurs mécaniques libres

Classe 12^{ème} SE, SB

Discipline : Physique

Objectifs : L'élève doit être capable de :

- définir un oscillateur, un oscillateur mécanique, un oscillateur libre et un oscillateur harmonique ;
- citer des exemples d'oscillateurs mécaniques ;
- définir l'amortissement des oscillations ;
- définir un pendule élastique, un pendule simple, un pendule de torsion ;
- établir l'équation différentielle des oscillations d'un pendule élastique, d'un pendule pesant, d'un pendule simple et d'un pendule de torsion ;
- donner la solution de l'équation différentielle du mouvement d'un oscillateur pour des amplitudes faibles ;
- écrire les expressions de la vitesse et de l'accélération du mouvement en fonction du temps ;
- écrire les expressions de la période, de la pulsation et de la fréquence propres ;
- écrire les expressions des énergies cinétiques et potentielle et en déduire celle de l'énergie mécanique totale du système ;
- représenter graphiquement l'énergie potentielle en fonction de des elongations ;
- établir l'équation de conservation de l'énergie mécanique totale d'un oscillateur non amorti ;
- écrire les expressions de la vitesse et de la tension du fil d'un pendule simple en fonction de l'élongation ;
- définir le pendule simple synchrone d'un pendule pesant ;
- définir un pendule de torsion ;
- établir l'expression différentielle du pendule à partir de l'étude dynamique ;
- établir l'équation de la conservation de l'énergie totale du pendule ;
- écrire les expressions des équations horaires, de la pulsation, de la période et de la fréquence propre.

I. Exemples d'oscillateurs :

Un système est en équilibre stable si légèrement écarté de cet équilibre il tend à y revenir. Ce retour s'effectue généralement par des oscillations.

Les systèmes physiques qui possèdent une position d'équilibre stable sont des oscillateurs.

1. Exemples :

Comme oscillateurs, on peut citer : la balançoire, l'aiguille d'une boussole, le balancier d'une horloge, une automobile sur ses amortisseurs, un tambour

Tous ces systèmes, possèdent une position d'équilibre stable, qu'ils finissent par retrouver après oscillations quand aucune action extérieure n'intervient pour entretenir leurs mouvements.

Plus généralement, les solides, les liquides et les gaz sont des oscillateurs.

A l'échelle moléculaire, le comportement oscillatoire des molécules peut être décrit approximativement par le modèle : Fig. I 1.

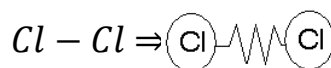


Fig. I 1

2. Définitions :**a. Oscillateur :**

Un oscillateur est un système physique qui possède une position d'équilibre stable.

b. Oscillateur mécanique :

Un oscillateur mécanique est un objet qui se déplace en repassant périodiquement par une position d'équilibre stable.

c. Oscillateur libre :

Un oscillateur libre est un système non soumis aux forces extérieures, il oscille librement lorsqu'il est écarté de sa position d'équilibre stable.

d. Un oscillateur harmonique :

Un oscillateur harmonique est un oscillateur dont l'équation horaire du mouvement est une fonction sinusoïdale du temps.

$$x = A\cos(\omega t + \varphi) \text{ ou } x = A\sin(\omega t + \varphi)$$

A est l'amplitude des oscillations, ω est la pulsation et φ la phase initiale.

3. Amortissement:

Du fait des frottements extérieurs, les oscillations deviennent de moins en moins amples : elles sont amorties. Les oscillateurs finissent par se retrouver immobiles. Les forces responsables de cet amortissement sont qualifiées de dissipatives.

En théorie ces forces dissipatives seront supposées, suffisamment petites pour être considérées comme nulles. Dans ces conditions, les oscillations ne sont plus amorties.

II. Le pendule élastique :**1. Les différentes pendules élastiques :**

Pendule élastique horizontal :

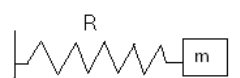


Fig. I 2

Pendule élastique vertical :

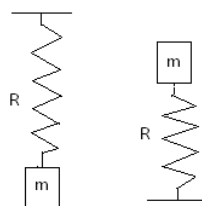


Fig. I 5

Pendule élastique à ressort incliné : Fig. I 4. Deux ressorts en série : Fig. I 6.

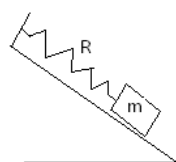


Fig. I 3



Fig. I 7

Deux ressorts en parallèle : Fig. I 7.

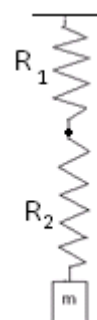
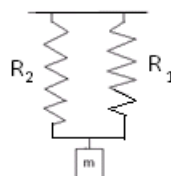


Fig. I 6

2. Définition d'un pendule élastique :

Un pendule élastique est un oscillateur mécanique de translation. Il effectue des oscillations dans une seule direction.

3. Etude du mouvement :**a. Equation différentielle d'un pendule élastique horizontal :**

La position d'équilibre stable correspond à $x=0$, le ressort n'est ni tendu, ni comprimé. Fig. I 8.

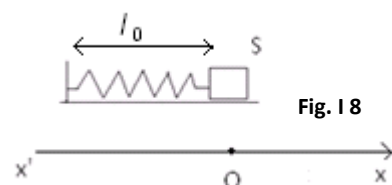


Fig. I 8

Ecartons légèrement le solide S de sa position d'équilibre, puis lâchons-le. Il se met à osciller de part et d'autre de sa position d'équilibre stable. Fig. I 9.

Système : solide S

Référentiel : terrestre

Bilan des forces :

- le poids $\vec{P}$;
- la réaction du plan $\vec{R}$;
- la tension du ressort $\vec{T}$ avec $T = kx$, k est la raideur du ressort.

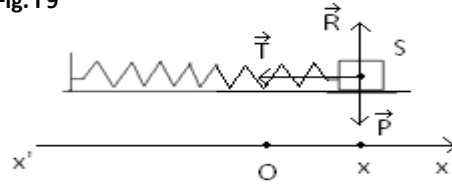
$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{P} + \vec{R} + \vec{T} = m\vec{a}$$

L'effet du poids est annulé par la réaction : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$

On a donc $\vec{T} = m\vec{a} \Rightarrow -T = ma$ ou $-kx = m\ddot{x}$

$$\boxed{\ddot{x} = -\frac{k}{m}x} \text{ C'est l'équation différentielle du mouvement.}$$

Fig. I 9



b. Equation différentielle d'un pendule élastique vertical :

❖ A l'équilibre l'allongement du ressort est : Fig. I 10 a.

$$\Delta l = l - l_0$$

Le solide est soumis à l'action :

- du poids $\vec{P} = m\vec{g}$
 - et de la tension $\vec{T}$ avec $T = k \cdot \Delta l$
- $$\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$$

$$P - T = 0 \Rightarrow mg - k\Delta l = 0 \text{ ou } mg = k\Delta l$$

❖ Etudions le mouvement du solide, soit x l'abscisse du mobile à la date t . Fig. I 10 b.

Le ressort s'allonge de $\Delta l + x$.

Système : solide

Référentiel : terrestre

Bilan des forces :

- le poids $\vec{P} = m\vec{g}$,
- la tension $\vec{T}$ avec $T = k \cdot (\Delta l + x)$

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{P} + \vec{T} = m\vec{a}$$

$$P - T = ma \Rightarrow mg - k \cdot (\Delta l + x) = m\ddot{x} \Rightarrow mg - k\Delta l - kx = m\ddot{x}$$

$$\text{Or } mg - k\Delta l = 0 \Rightarrow -kx = m\ddot{x} \text{ d'où l'équation différentielle : } \boxed{\ddot{x} = -\frac{k}{m}x}$$

Remarque : Pour un pendule élastique constitué par une masse et un ressort, l'équation différentielle est de la forme $\ddot{x} = -\frac{k}{m}x$ quelque soit la position du pendule.

Fig. I 10 a.

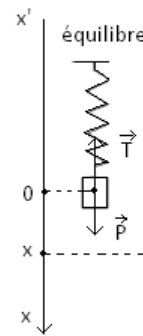
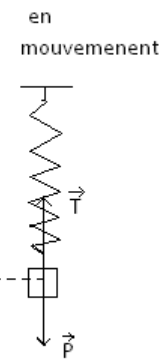


Fig. I 10 b.



c. Equation horaire :

La solution de l'équation différentielle est de la forme : $x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$
 x_m, φ et ω_0 sont des constantes.

Vérification :

La vitesse du solide est $v = \dot{x} = -\omega_0 \cdot x_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$.

L'accélération du solide est $a = \ddot{x} = -\omega_0^2 x_m \cos(\omega_0 t + \varphi) = -\omega_0^2 x$.

En reportant dans l'équation différentielle $\ddot{x} = -\frac{k}{m}x$, il vient :

$-\omega_0^2 x = -\frac{k}{m}x$, cette équation est satisfaite quelque soit t si $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$

x_m et φ dépendent des conditions initiales (position et vitesse). $x(t)$ varie entre $-x_m$ et $+x_m$.

x_m est l'amplitude des oscillations (ou élongation maximale). Elle est positive.

La loi horaire qui donne l'abscisse du centre d'inertie du solide est une fonction sinusoïdale :

$$x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

Le pendule élastique est un oscillateur harmonique.

$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ est la **pulsation propre** des oscillations. Elle s'exprime en $rad.s^{-1}$.

La **période propre** de l'oscillateur est :

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{m}}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Ainsi la période est : $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$, elle s'exprime en seconde (s).

La fréquence propre des oscillations est $N_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{\omega_0}{2\pi}$

d. Etude énergétique :

L'expression de l'énergie cinétique de translation est :

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m[-\omega_0 x_m \sin(\omega_0 t + \varphi)]^2$$

$$E_C = \frac{1}{2}m\omega_0^2 x_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi), \text{ or } \omega_0^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow$$

$$E_C = \frac{1}{2}kx_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi).$$

L'expression de l'énergie potentielle élastique est :

$$E_P = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}k[x_m \cos(\omega_0 t + \varphi)]^2 = \frac{1}{2}kx_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi)$$

L'énergie mécanique du système est :

$$E = E_C + E_P = \frac{1}{2}kx_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi) + \frac{1}{2}kx_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi) = \frac{1}{2}kx_m^2 [\sin^2(\omega_0 t + \varphi) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi)] = \frac{1}{2}kx_m^2 = Cte$$

L'énergie mécanique d'un pendule élastique non amorti est constante : $E = \frac{1}{2}kx_m^2$.

4. Puits de potentiel :

La représentation graphique de l'évolution de l'énergie potentielle élastique $E_P = \frac{1}{2}kx^2 = f(x)$ est une parabole. Le mobile oscille entre $-x_m$ et x_m . Fig. I 11.

Aux points d'abscisse $-x_m$ et x_m $E_C = 0$ et $E_P = E$.

Au passage par la position d'équilibre $x = 0$, $E_P = 0$ et $E = E_P$.

Au cours des oscillations, l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique et inversement.

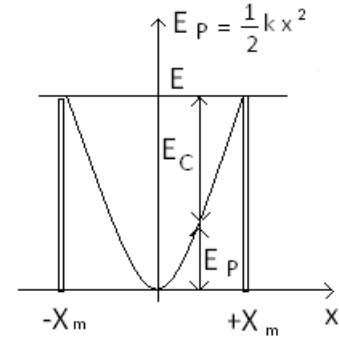


Fig. I 11

III. Le pendule de torsion :

1. Définition :

Un pendule de torsion peut être constitué par un solide S suspendu en centre d'inertie G par un fil de torsion de constante C.

2. Étude dynamique :

a. Équation différentielle :

La position d'équilibre stable est $\theta=0$.

Étudions le mouvement du pendule à la date t, lorsque son élongation est θ . Fig. I 12.

Système : solide

Référentiel : terrestre

Bilan des forces appliquées au solide:

- le poids $\vec{P}$;
- la tension du fil $\vec{T}$;
- le couple de torsion.

D'après la relation $\sum \mathcal{M}_\Delta = J_\Delta \cdot \ddot{\theta}$

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{P}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{T}) + \mathcal{M} = J_\Delta \cdot \ddot{\theta}$$

J_Δ est le moment d'inertie du solide par rapport à l'axe Δ qui est confondu avec le fil.

Les moments de $\vec{P}$ et $\vec{T}$ sont nuls par rapport à l'axe Δ : $\mathcal{M}_\Delta(\vec{P}) = \mathcal{M}_\Delta(\vec{T}) = 0$

Le moment du couple de torsion est $\mathcal{M} = -C\theta$.

$$\text{Soit } J_\Delta \cdot \ddot{\theta} = -C\theta \Rightarrow \ddot{\theta} = -\frac{C}{J_\Delta} \theta.$$

L'équation différentielle du pendule de torsion est :

$$\boxed{\ddot{\theta} = -\frac{C}{J_\Delta} \theta} \text{ ou } \boxed{\ddot{\theta} + \frac{C}{J_\Delta} \theta = 0}$$

L'équation est du type : $\ddot{\theta} = -\omega_0^2 \theta$ ou $\ddot{\theta} + \omega_0^2 \theta = 0$ avec $\omega_0^2 = \frac{C}{J_\Delta}$.

b. Équation horaire :

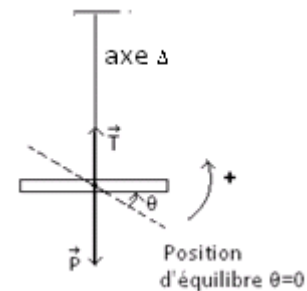
La solution de cette équation est une fonction sinusoïdale du type :

$$\theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

Le pendule de torsion est un oscillateur harmonique. Il oscille entre $-\theta_m$ et θ_m .

La pulsation propre est : $\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{J_\Delta}}$, C est en $\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}$, J_Δ en kg.m^2 et ω_0 en rad.s^{-1} .

Fig. I 12



La période propre est $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J_\Delta}{C}}$.

3. Étude énergétique :

L'énergie cinétique du pendule de torsion est $E_C = \frac{1}{2} J_\Delta \cdot \dot{\theta}^2$, $\dot{\theta}$ est la vitesse angulaire du solide.

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = -\omega_0 \theta_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$$

$$E_C = \frac{1}{2} J_\Delta \cdot \dot{\theta}^2 = \frac{1}{2} J_\Delta \cdot [-\omega_0 \theta_m \sin(\omega_0 t + \varphi)]^2$$

$$= \frac{1}{2} J_\Delta \omega_0^2 \cdot \theta_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi)$$

$$\text{Or } \omega_0^2 = \frac{C}{J_\Delta} \Rightarrow E_C = \frac{1}{2} C \cdot \theta_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi)$$

L'énergie potentielle élastique du pendule de torsion est :

$$E_P = \frac{1}{2} C \theta^2$$

$$\theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi) \Rightarrow E_P = \frac{1}{2} C \cdot \theta_m^2 \cdot \cos^2(\omega_0 t + \varphi)$$

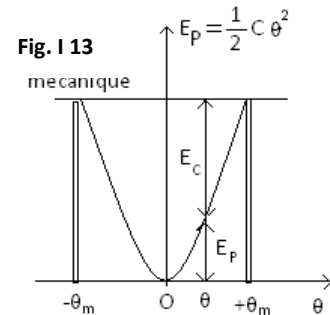
L'énergie mécanique d'un pendule de torsion non amorti est :

$$E = E_C + E_P = \frac{1}{2} C \cdot \theta_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi) + \frac{1}{2} C \cdot \theta_m^2 \cdot \cos^2(\omega_0 t + \varphi)$$

$$= \frac{1}{2} C \cdot \theta_m^2 \cdot [\sin^2(\omega_0 t + \varphi) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi)] = \frac{1}{2} C \cdot \theta_m^2 = \text{Cte}$$

Lorsqu'il n'y a pas de phénomène dissipatifs d'énergie, l'énergie mécanique d'un pendule de torsion non amorti est constante.

Au cours des oscillations, l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique et inversement. Fig. I 13.



Pour la SE seulement :

IV. Le pendule pesant :

1. Définition :

Le pendule pesant est constitué par un solide (S) suspendu à un axe horizontal Δ ne passant pas par le centre d'inertie G. On pose $OG = l$

2. Étude dynamique :

a. Équation différentielle :

L'équilibre est établi pour deux valeurs de θ , $\theta = 0$ et $\theta = \pi$.

La position d'équilibre stable est $\theta = 0$.

Ecarté de sa position d'équilibre stable, le solide effectue un mouvement de rotation autour de l'axe Δ . Fig. I 14.

Etude du mouvement :

Système : solide

Référentiel : terrestre

Bilan des forces :

- le poids $\vec{P} = m\vec{g}$;
- la réaction de l'axe: $\vec{R}$.

La relation $\sum \mathcal{M}_{\vec{F}_{ext/\Delta}} = J_{\Delta} \cdot \ddot{\theta} \Rightarrow \mathcal{M}(\vec{P})_{\Delta} + \mathcal{M}(\vec{R})_{\Delta} = J_{\Delta} \cdot \ddot{\theta}$

Le moment du poids avec le sens positif choisi est : $\mathcal{M}(\vec{P})_{\Delta} = -mg \cdot d = -mgl \sin \theta$

Le moment de la réaction est nul, sa direction passe par l'axe Δ . $\mathcal{M}(\vec{R})_{\Delta} = 0$.

D'où : $J_{\Delta} \cdot \ddot{\theta} = -mgl \sin \theta$

L'équation différentielle est : $\ddot{\theta} = -\frac{mgl}{J_{\Delta}} \sin \theta$

La solution $\theta = f(t)$ n'est pas sinusoïdale, c'est pourquoi dans le cas générale, le pendule pesant (composé) n'est pas un oscillateur harmonique.

b. Cas des oscillations de faibles amplitudes :

Si θ est petit, on peut faire l'approximation $\sin \theta \approx \theta \text{ rad}$. L'équation différentielle s'écrit :

$$\ddot{\theta} = -\frac{mgl}{J_{\Delta}} \theta$$

Dans cette condition, la solution est sinusoïdale, les oscillations sont harmoniques.

L'équation horaire du mouvement est: $\theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$.

La pulsation propre est : $\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{J_{\Delta}}}$.

La période propre des oscillations est : $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J_{\Delta}}{mgl}}$

3. Étude énergétique :

S'il n'y a pas de phénomène dissipatifs d'énergie, l'énergie mécanique se conserve. L'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique et inversement.

L'énergie potentielle du système solide-Terre est $E_p = mgl(1 - \cos \theta)$

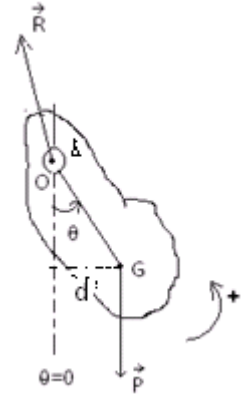


Fig. I 14

La courbe présente un minimum pour $\theta = 0$ et un maximum pour $\theta = \pi$. Elle n'est pas parabolique. Les oscillations ne sont pas sinusoïdales.

Si θ est petit, $\cos\theta \approx 1 - \frac{\theta^2}{2} \Rightarrow E_p = mgl \cdot \frac{\theta^2}{2}$. La courbe est une parabole, les oscillations sont harmoniques.

V. Le pendule simple :

1. Définition :

On appelle pendule simple un point matériel suspendu à un point fixe par un fil inextensible et de masse négligeable. Fig. I 15.

2. Période :

Le pendule simple est une modélisation du pendule pesant, son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation est $J_\Delta = ml^2$.

La période du pendule est alors $T_0 = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J_\Delta}{mgl}} = 2\pi \sqrt{\frac{ml^2}{mgl}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

D'où : $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, T en s ; l en m et g en m.s^{-2} .

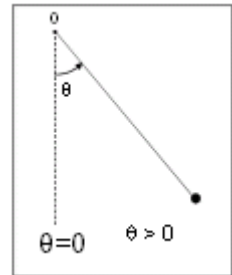


Fig. I 15

4. Pendule simple synchrone d'un pendule pesant :

Un pendule simple qui a la même période qu'un pendule pesant est appelée pendule simple synchrone de ce pendule pesant.

3. Lois particulières du pendule simple:

- ❖ Dans le cas d'une amplitude maximale faible ($\theta_{\max} < 10^\circ$), la période propre d'un pendule simple non amorti est indépendante de l'amplitude des oscillations. On parle d'isochronisme des petites oscillations.
- ❖ La période du pendule simple est indépendante de la nature de la matière du point matériel et de sa masse.
- ❖ La période du pendule simple est proportionnelle à la racine carrée de la longueur du pendule.
- ❖ La période du pendule simple est inversement proportionnelle à la racine carrée de l'accélération de la pesanteur.

4. Calcul de la vitesse et de la tension du fil en fonction de l'élongation :

Etudions le mouvement de la masse m :

- Système : solide ponctuel de masse m
- Référentiel : terrestre, galiléen
- Bilan des forces :
 - le poids $\vec{P} = m\vec{g}$;
 - la tension du fil $\vec{T}$.

Le théorème de l'énergie cinétique entre A et M est :

$$E_{CM} - E_{CA} = W_{\vec{P}} + W_{\vec{T}}$$

En A la vitesse est nulle (le système part du repos).

En M la vitesse est v . Fig. I 16.

Le travail du poids est: $W_{\vec{P}} = mgh$.

Le travail de la tension est nulle car $\vec{T}$ est orthogonal à $\vec{v}$.

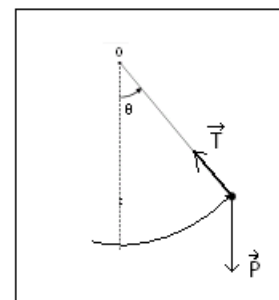


Fig. I 16

Ainsi : $\frac{1}{2}mv^2 - 0 = mgh$ ou $\frac{1}{2}mv^2 = mgh \Rightarrow v^2 = 2gh$

Soit A' la projection de A sur la verticale et M' la projection de M sur la verticale. $h = OM' - OA'$
 $OM' = OM \cos \theta$ et $OA' = OA \cos \theta_m$ avec $OA = OM = l$. Fig. I 17.

Ainsi : $v^2 = 2gh = 2g(l \cos \theta - l \cos \theta_m)$

$$v^2 = 2gl(\cos \theta - \cos \theta_m)$$

La relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

$$\vec{P} + \vec{T} = m \cdot \vec{a}$$

La projection de cette relation sur la normale donne : Fig. I 18.

$$\vec{P}_N + \vec{T} = m \cdot \vec{a}_N \Rightarrow -P_N + T = m \cdot a_N \Rightarrow T = P_N + m \cdot a_N$$

$$P_N = P \cos \theta = mg \cos \theta \text{ et } a_N = \frac{v^2}{l}$$

Ainsi $T = mg \cos \theta + m \cdot \frac{v^2}{l}$, en remplaçant v^2 par son expression, on obtient :

$$T = mg \cos \theta + 2mg(\cos \theta - \cos \theta_m)$$

En fin : $T = mg(3 \cos \theta - 2 \cos \theta_m)$

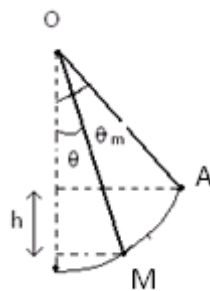


Fig. I 17

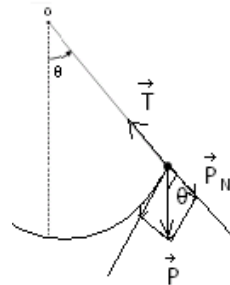


Fig. I 18

II OSCILLATEURS ÉLECTRIQUES LIBRES

Classe SE, SB

Discipline : Physique

Objectifs :

- décrire la décharge d'un condensateur ;
- établir l'équation différentielle en en déduire l'équation horaire des oscillations ;
- écrire les expressions de la pulsation, de la période, et de la fréquence ;
- écrire les expressions de l'énergie totale du circuit idéal à partir des expressions des énergies électrostatique et électromagnétique ;
- établir une analogie entre les grandeurs et relations du circuit oscillant et celles de l'oscillateur mécanique libre.

I. Décharge d'un condensateur dans une inductance pure :

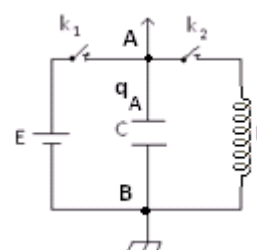
1. Expérience :

Le montage est le suivant : l'armature B du condensateur est liée à la masse, l'armature A est liée à une des voies de l'oscilloscope.

En fermant l'interrupteur k_1 , k_2 étant ouvert, l'oscillogramme montre que la tension aux bornes du condensateur devient instantanément égale à la f.é.m. du générateur : le condensateur s'est chargé.

En ouvrant l'interrupteur k_1 , puis en fermant l'interrupteur k_2 , l'oscillogramme montre que la tension aux bornes du condensateur est oscillante. Cela justifie le nom de circuit oscillant donné au dipôle L,C.

Fig. II 1



2. Interprétation :

Les variations de la charge q_A du condensateur en fonction du temps traduisent le fait que le condensateur se charge et se décharge périodiquement à travers la bobine.

La charge de l'armature A diminue, passe d'une valeur positive à une valeur nulle (décharge), puis d'une valeur nulle à une valeur négative (nouvelle charge avec $q_A < 0$).

II. Étude théorique :

Équation différentielle :

Le condensateur est initialement chargé. L'armature A porte la charge Q_m positive, l'armature B porte la charge $-Q_m$. Fig. II 2.

□ A la date $t = 0$, on relie le condensateur chargé à la bobine.

Avec le sens positif choisi, si $i > 0$ la charge du condensateur augmente au cours du temps

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

La tension aux bornes du condensateur est $u_{AB} = u_C = \frac{q}{C}$.

La tension aux bornes de la bobine est : $u_{BA} = u_L = ri - e$, $r = 0$ et $e = -L \frac{di}{dt}$.

$$u_{BA} = u_L = L \frac{di}{dt}.$$

L'association des deux dipôles conduit à :

$$u_{AB} + u_{BA} = 0 \Leftrightarrow u_C + u_L = 0 \Rightarrow \frac{q}{C} + L \frac{di}{dt} = 0, \text{ or } i = \frac{dq}{dt} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2} = \ddot{q}.$$

$$\text{Ainsi : } \frac{q}{C} + L\ddot{q} = 0 \Rightarrow \ddot{q} + \frac{1}{LC}q = 0$$

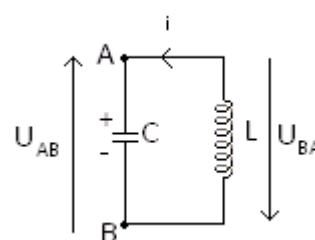


Fig. II 2

L'équation différentielle des oscillations est :

$$\ddot{q} + \frac{1}{LC}q = 0 \text{ ou } \ddot{q} = -\frac{1}{LC}q$$

Posons $\omega_0^2 = \frac{1}{LC} > 0$, l'équation différentielle dévient : $\ddot{q} + \omega_0^2 q = 0$. C'est l'équation générale des oscillateurs harmoniques.

La solution de l'équation différentielle est une fonction sinusoïdale du temps :

$$q = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

L'intensité du courant est : $i = \frac{dq}{dt} = -\omega_0 Q_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$.

La pulsation propre des oscillations est : $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

La période propre des oscillations est : $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{LC}$.

Les constantes Q_m et φ dépendent des conditions initiales d'excitation.

Représentation graphique de q et i ou u et i : Fig. II 3.

En choisissant $\varphi = 0$ à la date $t=0$, traçons les graphes $q(t)$ et $i(t)$.

t	0	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{3T_0}{4}$	T_0
$Q(t)$	$+Q_m$	0	$-Q_m$	0	$+Q_m$
$i(t)$	0	$-I_m$	0	$+I_m$	0

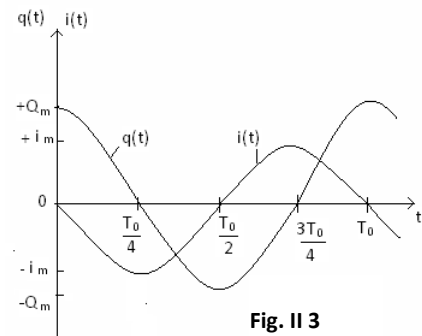


Fig. II 3

Remarque :

Choisissons pour i le sens inverse de celui choisit précédemment :

Si $i > 0$, q décroît au cours du temps, alors $i = -\frac{dq}{dt}$. Fig. II 4.

La tension aux bornes du condensateur est : $u_{AB} = u_C = \frac{q}{C}$.

La tension aux bornes de la bobine est :

$$u_{AB} = u_L = L \frac{di}{dt}, \text{ or } i = -\frac{dq}{dt} \Rightarrow \frac{di}{dt} = -\frac{d^2q}{dt^2} = -\ddot{q} \Rightarrow u_L = -L\ddot{q}.$$

$$\text{Ainsi } u_L = u_C \Rightarrow -L\ddot{q} = \frac{q}{C} \Rightarrow$$

L'équation différentielle des oscillations est :

$$\ddot{q} = -\frac{1}{LC}q \text{ ou } \ddot{q} + \frac{1}{LC}q = 0.$$

La solution est : $q = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$;

L'intensité du courant est : $i = -\frac{dq}{dt} = \omega_0 Q_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$.

III. Étude énergétique :

L'expression de l'énergie magnétique de la bobine est :

$$E_L = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} L [-\omega_0 Q_m \sin(\omega_0 t + \varphi)]^2$$

$$E_L = \frac{1}{2} L \omega_0^2 Q_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi), \text{ or } \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow E_L = \frac{1}{2} \frac{Q_m^2}{C} \sin^2(\omega_0 t + \varphi).$$

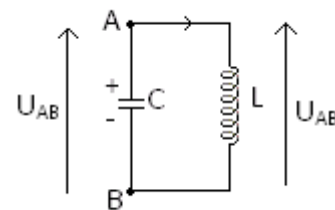


Fig. II 4

L'expression de l'énergie électrique du condensateur est:

$$E_C = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2C} [Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)]^2 = \frac{1}{2} \frac{Q_m^2}{C} \cos^2(\omega_0 t + \varphi)$$

L'énergie électrique totale du système est :

$$\begin{aligned} E = E_L + E_C &= \frac{1}{2} \frac{Q_m^2}{C} \sin^2(\omega_0 t + \varphi) + \frac{1}{2} \frac{Q_m^2}{C} \cos^2(\omega_0 t + \varphi) \\ &= \frac{1}{2} \frac{Q_m^2}{C} [\sin^2(\omega_0 t + \varphi) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi)] = \frac{1}{2} \frac{Q_m^2}{C} = Cte \end{aligned}$$

L'énergie électrique d'un circuit LC non amorti est constante : $E = \frac{1}{2} \frac{Q_m^2}{C}$.

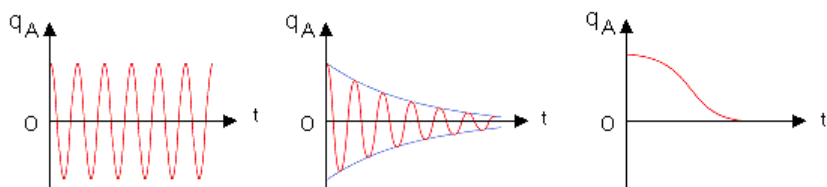
IV. Analogies entre oscillateurs électrique et mécanique libres :

	Oscillateurs mécanique de translation			Oscillateurs mécanique de rotation			Oscillateurs électrique		
Équation différentielle	$m\ddot{x} + kx = 0$			$J\ddot{\theta} + C\theta = 0$			$L\ddot{q} + \frac{1}{C}q = 0$		
Conservation de l'énergie	$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = E_{méc}$			$\frac{1}{2}J\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}C\theta^2 = E_{méc}$			$\frac{1}{2}Li^2 + \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} = E_{élec}$		
Grandeurs analogues	x	$v = \dot{x}$	$a = \ddot{x}$	θ	$\dot{\theta}$	$\ddot{\theta}$	q	$i = \dot{q}$	$\ddot{q}$
	m		k	J		C	L		$\frac{1}{C}$

V. Influence de la résistance du circuit :

Dans un circuit comportant un condensateur, une bobine et une résistance (circuit R,L,C), l'énergie électrique est dissipée par effet joule dans la résistance : il y a amortissement des oscillations.

L'oscillateur évolue librement vers sa position d'équilibre stable, selon un régime déterminé par l'importance de l'amortissement :



Résistance nulle
Régime sinusoïdale
périodique
 $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$

Fig. II a.

Résistance faible
Régime **pseudo-périodique**
 T_1 voisin de T_0

Fig. II b.

Résistance importante
Régime **apériodique**

Fig. II c.

En présence de résistance R, l'énergie électromagnétique est dissipée en chaleur. Les oscillations électriques diminuent d'amplitude ou même disparaissent.

III ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Classe SE, SB

Discipline : Physique

Objectifs :

- définir une onde électromagnétique ;
- citer les principales propriétés des ondes électromagnétiques ;
- classer les ondes électromagnétiques à partir de leur longueur d'ondes et de citer leur domaines d'applications ;
- définir les radiations infrarouge et ultraviolette ;
- citer quelques sources de production des I.R. et U.V. ;
- citer les principales propriétés des I.R. et U.V. ;
- citer des domaines d'applications des I.R. et U.V..

I. Ondes électromagnétiques :

1. Définition :

On appelle ondes électromagnétiques le champ électromagnétique variable se propageant dans l'espace.

Les ondes électromagnétiques sont transversales : le vecteur champ électrique $\vec{E}$ et le champ magnétique $\vec{B}$ sont réciproquement perpendiculaires et situés dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

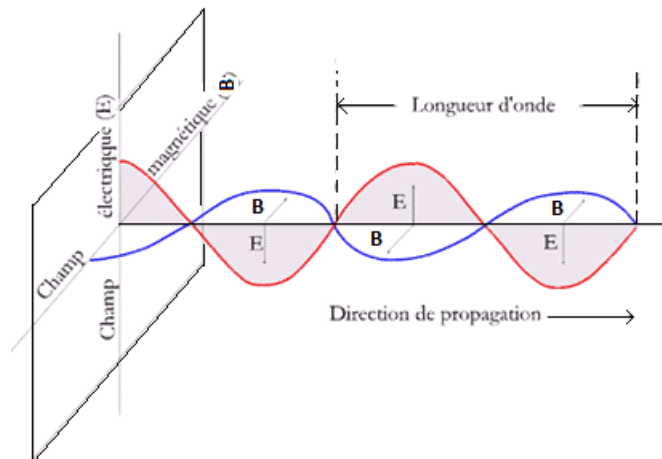


Fig. III 1

2. Propriétés des ondes électromagnétiques:

Célérité : Les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière. Dans le vide la célérité des ondes est $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

Réflexion : Les ondes électromagnétiques se réfléchissent sur les surfaces métalliques et d'une manière générale sur les conducteurs. Elles obéissent, en ce qui concerne les directions de leur rayon aux lois de l'optique géométrique.

Réfraction : Comme le vide, les corps isolants transmettent, avec une célérité toutefois différente qui dépend du milieu traversé. A la surface de séparation de deux milieux transparents, les ondes électromagnétiques subissent une réfraction analogue à celle de la lumière et obéissent à des lois de même nature.

Interférences : On obtient des franges d'interférences en superposant des ondes électromagnétiques venant de deux émetteurs synchrones.

Ondes stationnaires : En plaçant un réflecteur perpendiculairement à la direction de propagation des ondes électromagnétiques, nous obtenons des ondes stationnaires.

Polarisation : les ondes électromagnétiques sont :

- transversales ($\vec{E}$ et $\vec{B}$ forment un plan d'onde normale au rayon de propagation).
- polarisée ($\vec{E}$ est toujours parallèle au dipôle émetteur).

L'expérience montre que les ondes électromagnétiques présentent ce double caractère quelque soit le dispositif qui le rayonne.

3. Spectres, application des ondes électromagnétiques :

Le domaine des ondes électromagnétiques :

Grandes ondes Ondes longues	$\lambda > 800\text{m}$	Télécommunication maritime, radiodiffusion
Ondes moyennes	$800 > \lambda > 100\text{m}$	Radiodiffusion
Ondes courtes	$100\text{m} < \lambda < 10\text{m}$	Radiodiffusion et radiotéléphonie
Ondes très courtes	$\lambda < 10\text{m}$	Radiodiffusion en modulation de fréquence, télévision, radar, relais téléphonique hertzienne

II. Radiations infrarouges et ultraviolettes :

1. Radiations infrarouges :

a. Mise en évidence :

Réalisons l'expérience de la dispersion de la lumière blanche avec un prisme en quartz.

Une pile thermoélectrique, placée dans la partie rouge du spectre, donne une intensité qui croît lorsqu'on la déplace en deçà du rouge, preuve que la lumière blanche comprend des radiations invisibles, dites infrarouge de longueurs d'ondes supérieures à celles du rouge extrême.

$$0,8\mu < \lambda < 500\mu.$$

b. Production :

Le rayonnement émis par un corps chaud est constituée de radiations infrarouges.

c. Absorption :

Quand les radiations frappent un corps, l'énergie qu'elles transportent est en partie renvoyée, mais le corps en absorbe une partie. A égalité d'épaisseur traversée, l'absorption est extrêmement variable d'un corps à l'autre. Pour la plupart des corps l'absorption est un phénomène sélectif, elle varie avec la longueur d'ondes de la radiation.

d. applications :

L'émission d'un rayonnement IR par un corps chaud permet :

- la **télécommunication** ou transmission d'un message grâce à une télécommande.
- la **photographie** de nuit grâce à des films sensibles aux IR.

- la **thermographie** médicale: par analyse des IR émis par le corps humain on peut détecter les anomalies liées à des différences de température (cancer du sein par exemple).

L'absorption du rayonnement IR par un corps augmente en général sa température. Cet effet thermique trouve des applications :

- **industrielles** : séchage des peintures et vernis des voitures dans des fours à IR, dessiccation de produits chimiques, déshydratation de produits alimentaires ...

- **médicales** : réchauffement des muscles et soin des douleurs rhumatismales en kinésithérapie.

(Attention: les rayons IR peuvent entraîner des lésions du cristallin et de la rétine).

- **agronomiques** : pendant le jour les rayons solaires (IR) traversent la vitre de la serre et sont absorbés par la Terre ce qui la réchauffe et facilite la synthèse chlorophyllienne.

2. Radiations ultraviolettes :

a. Mise en évidence :

Un écran fluorescent E (au platinocyanure de baryum) placé dans le domaine du violet et au delà du spectre de la lumière blanche s'illumine. Cela montre qu'il existe aussi d'autres radiations invisibles, dites ultraviolettes, de longueurs d'ondes inférieures à celles du violet extrême. $0,2\mu < \lambda < 0,4\mu$.

b. Production :

La principale source naturelle d'UV est le Soleil.

Au laboratoire, la production d'UV s'effectue avec des lampes à vapeur de mercure.

c. Absorption :

L'absorption d'un rayonnement par un matériau dépend généralement :

- de la longueur d'onde λ de la radiation,
- de la nature et de l'épaisseur du corps absorbant.

Le **verre** absorbe les UV de longueur, le quartz de l'ampoule de la lampe à vapeur de mercure est transparent aux UV.

L'**atmosphère** absorbe partiellement les UV:

- grâce au dioxygène pour $\lambda < 200$ nm (U.V.)
- grâce à la couche d'ozone de la haute atmosphère pour $\lambda < 300$ nm (U.V.).

d. Applications :

L'énergie rayonnante ultraviolette peut être transformée :

- en **énergie rayonnante visible** : c'est le phénomène de fluorescence;
- en **énergie électrique** dans les photopiles (ou cellules photovoltaïques);
- en **énergie chimique** lors des réactions photochimiques: c'est le cas de l'impression de plaques photographiques, de la photosynthèse chlorophyllienne....

Les radiations ultraviolettes sont utilisées également dans la **désinfection et la stérilisation** de l'eau, des instruments chirurgicaux, des outils de coiffure, ... peut s'effectuer à l'aide de lampes à vapeur de mercure qui émettent des UV dont la longueur d'onde est ($\lambda < 290$ nm) et détruisent les microbes.

La **formation de la vitamine D** nécessaire à la croissance, **l'augmentation du taux d'hémoglobine** dans le sang sont favorisées par une irradiation UV.

Chapitre 5 : Oscillations forcées.

I OSCILLATIONS MÉCANIQUES FORCÉES : RÉSONANCE

Classe : 12^{ème} SE, SB

Discipline : Physique

Objectifs :

- décrire une expérience permettant de mettre en évidence une oscillation forcée ;
- définir une oscillation forcée ;
- définir l'état de résonance ;
- citer les facteurs influant sur la résonance ;
- citer des exemples de résonateurs : amortis ; sélectifs ;
- citer des applications de la résonance.

I. Étude expérimentales :

1. Oscillations forcées :

Expérience :

Le dispositif expérimental comprend :

- un moteur tournant à vitesse angulaire constante réglable ;
- un ressort de raideur k , lié au moteur par une corde inextensible AC ;
- un point d'attache C, excentré de sorte que, lorsque le moteur tourne, le point C décrive un cercle. Fig. I 1.

Le point A effectue un mouvement sinusoïdal, de fréquence égale à celle du moteur et d'amplitude constante. Le mouvement de A excite le ressort.

A l'autre extrémité B du ressort sont suspendus un objet de masse m et un dispositif permettant d'enregistrer l'élongation x de B.

On peut augmenter l'amortissement en mettant dans la cuve des liquides plus ou moins visqueux ; lorsqu'il n'y a pas de liquide dans la cuve, l'amortissement est dû à l'air : il est faible.

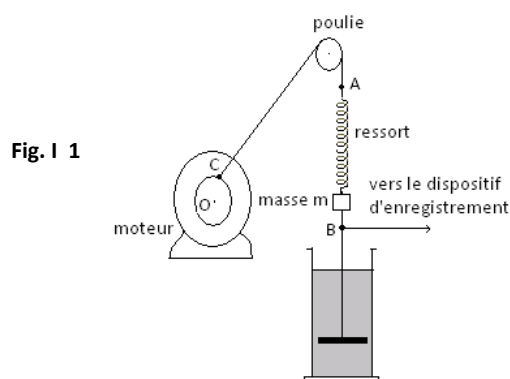


Fig. I 1

fig 1. Oscillateur mécanique:
dispositif expérimental

Le moteur en tournant, fait osciller le système « objet-ressort ».

Le moteur est l'excitateur, il impose sa fréquence N à l'oscillateur (pendule élastique).

Le système « objet-ressort » est le résonateur, sa fréquence propre est N_0 . Il subit la fréquence N de l'excitateur, par opposition aux oscillations libres, on dit que les oscillations sont forcées de fréquence N .

Ainsi : lors des oscillations forcées, un excitateur impose sa fréquence à un oscillateur.

L'excitateur est le dispositif qui impose sa fréquence. Le résonateur est l'oscillateur qui subit cette fréquence.

L'excitation impose au point A un mouvement sinusoïdal d'équation horaire :

$$x_A = a \cos(2\pi N t)$$

La réponse de l'oscillateur est l'élongation x du point B, son équation est :

$$x = x_M \cos(2\pi N t + \varphi).$$

La fréquence N de la réponse est égale à celle de l'excitateur, l'amplitude x_M de la réponse dépend de cette fréquence.

On appelle oscillations forcées d'un système les oscillations produites sous l'action de forces extérieures périodiques.

2. Le phénomène de résonance :

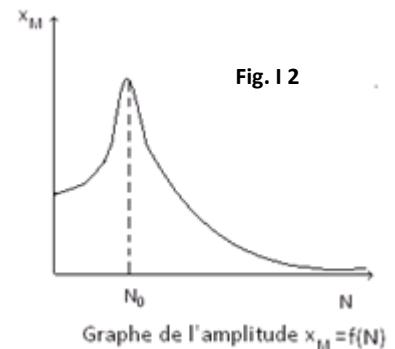
a. Courbe de réponse :

Portons sur un graphe l'amplitude x_M des oscillations forcées en fonction de la fréquence de ces oscillations. Si l'oscillateur n'est trop amorti, on obtient la courbe. (Fig. 1 2.)

Quand la fréquence N tend vers zéro (disparition des oscillations), x_M tend vers une valeur limite égale à l'amplitude a de l'excitateur.

Quand la fréquence N est très grande, x_M tend vers zéro. À cause de sa grande inertie, le résonateur ne peut plus osciller à la fréquence trop élevée imposée par l'excitateur.

Pour une fréquence proche de la fréquence propre N_0 de l'oscillateur l'amplitude devient très grande : c'est le phénomène de résonance.



b. Définition de l'état de résonance :

La réponse à une excitation sinusoïdale de fréquence N est une oscillation sinusoïdale de même fréquence N , dont l'amplitude est maximale lorsque la fréquence de l'excitateur est sensiblement égale à la fréquence propre de l'oscillateur: il y a alors résonance.

c. bande passante :

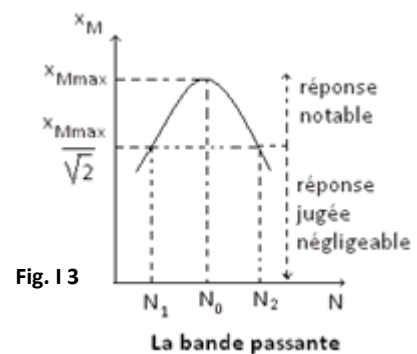
La bande passante est la bande de fréquences excitatrices pour lesquelles la réponse de l'oscillateur est notable.

Conventionnellement, la bande passante est définie comme la bande de fréquences qui provoque une réponse d'amplitude $x_M \geq \frac{x_{Mmax}}{\sqrt{2}}$. (Bande passante à 3 décibels).

La bande passante correspond donc à :

$$\Delta N = N_2 - N_1, \text{ tel que si } N \in \{N_1, N_2\}$$

$$\text{Alors } x_M \geq \frac{x_{Mmax}}{\sqrt{2}}.$$



3. Facteurs influant sur la résonance :

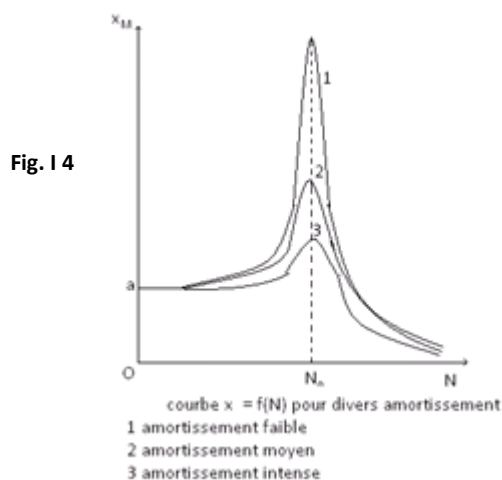
Traçons différentes courbes de réponses correspondant à différent amortissements pour une même amplitude d'excitation.

Toutes les courbes ont une même limite a quand N tend vers zéro.

La résonance est aiguë quand l'amortissement est faible : la bande passante est étroite. On dit que l'oscillateur est sélectif.

La résonance est floue quand l'amortissement est grand : l'oscillateur est non sélectif. La bande passante est large.

Ainsi, un oscillateur est sélectif lorsqu'il privilégie une fréquence, dans le cas contraire il est non sélectif.



II. Applications de la résonance :

Dans la pratique, la résonance des oscillateurs est parfois un avantage, parfois un inconvénient.

1. En mécanique :

Des oscillations forcées de trop fortes amplitudes risquent de détériorer les appareils mécaniques, il faut donc éviter des vibrations résonantes en mécanique.

- ❖ Selon le régime du moteur d'un véhicule certaines pièces peuvent entrer en résonance et provoquer des détériorations importantes.
- ❖ L'utilisation des amortisseurs permet d'éviter que l'ensemble châssis-suspension n'entre en résonance.
- ❖ Les ouvrages d'art (ponts, bâtiments, stades, etc.) sont des oscillateurs. Leur conception est faite de manière à éviter le phénomène de résonance.

2. En électroacoustique :

Le haut-parleur, le microphone sont des oscillateurs qui doivent restituer le son reçu sans qu'aucune fréquence ne soit privilégiée. Ce sont des oscillateurs très amortis : la résonance est floue.

3. En biologie :

Le tympan de l'oreille est une membrane qui entre en oscillations forcées sous l'effet des modifications de la pression de l'air dues à une onde sonore. Cette membrane est très amortie. La largeur de la bande passante correspond au domaine audible de son. Pour l'homme (entre 20Hz et 20000Hz environ).

Le corps humain est un système mécanique plus ou moins amorti. Certaines parties du corps possèdent des fréquences propres : appareils digestifs (1Hz), masse abdominale (3Hz), tête

(20Hz), globes oculaires (35 à 75 Hz). Soumise à des vibrations extérieures, ces parties peuvent entrer en résonance ; nous ressentons alors des sensations désagréables.

4. En électricité :

Un circuit RLC de résistance faible est très sélectif. Pour suivre une émission (radio ou télévision) particulière, il faut privilégier une fréquence au détriment des autres. Pour cela, on règle les valeurs de l'inductance L d'un circuit RLC de résistance R très faible pour obtenir une résonance et privilégier ainsi la fréquence désirée.

5. En acoustique :

La caisse de résonance d'un instrument de musique (tam-tam, guitare, violon etc.) est excitée par l'instrument. Elle entre en résonance et le son émis par la caisse a une intensité plus grande. La caisse ne doit pas renforcer une note plus qu'une autre. La résonance est floue : les oscillations sont amorties.

II RAPPELS SUR LA CONSTRUCTION DE FRESNEL

Classe : 12^{ème} SE, SB

Discipline : Physique

Objectif :

- projeter un vecteur dans un système d'axe ;
- représenter une fonction sinusoïdale et la composition de deux ou plusieurs par la construction de Fresnel ;
- déduire de la représentation de Fresnel les caractéristiques d'une vibration résultante de la composition de deux ou plusieurs fonctions sinusoïdales de même période.

1. Projection d'un vecteur tournant :

Dans le plan muni d'un repère orthonormé $(O, \vec{i}, \vec{j})$ traçons un vecteur $\vec{OA}$, de norme $\|\vec{OA}\| = a$, tournant avec une vitesse angulaire constante ω , dans le sens trigonométrique.

À l'instant $t=0$ $(\vec{Ox}, \vec{OA}) = \varphi$.

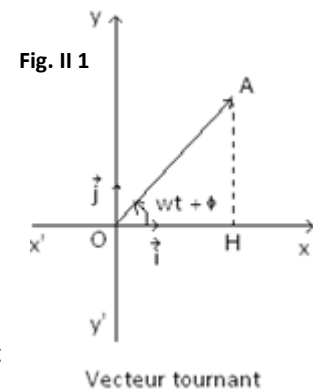
À l'instant de date t , le vecteur $\vec{OA}$ a balayé l'angle $\theta = \omega t$. Donc : $(\vec{Ox}, \vec{OA}) = \varphi$.

Projetons à cette date le vecteur $\vec{OA}$ sur l'axe $x'x$. Le vecteur projection $\vec{OH}$ a pour valeur algébrique :

$$\|\vec{OH}\| = x = a \cos(\omega t + \varphi). \text{Fig. II 1}$$

Le mouvement de la projection de l'extrémité du vecteur tournant sur l'axe $x'x$ est un mouvement sinusoïdal dont :

- l'amplitude est égale à la norme de $\vec{OA} = a$.
- la pulsation est égale à la vitesse angulaire ω de $\vec{OA}$.
- la phase à l'origine des dates est l'angle que fait le vecteur $\vec{OA}$ avec l'axe $x'x$ à l'instant de date $t=0$.



2. Vecteur de Fresnel :

À toute fonction sinusoïdale $x = a \cos(\omega t + \varphi)$, on peut faire correspondre un vecteur tournant $\vec{V}$.

La représentation de Fresnel consiste à tracer le vecteur $\vec{V}$ dans la position qu'il occupe à l'instant $t=0$.

On choisit :

- un axe $x'x$ de référence, appelé axe des phases ;
- un sens positif : le sens trigonométrique ;
- une échelle.
- l'angle $(\vec{Ox}, \vec{V})$ est la phase initiale φ .
- la norme du vecteur est égale à l'amplitude du mouvement.

On trace le vecteur $\vec{V}$ tel que : $\|\vec{V}\| = a$ et $(\vec{Ox}, \vec{V}) = \varphi$.

Exemples :

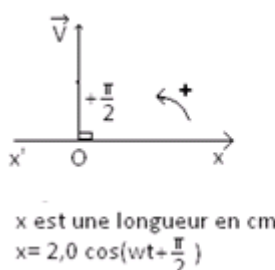


Fig. II 2 a.

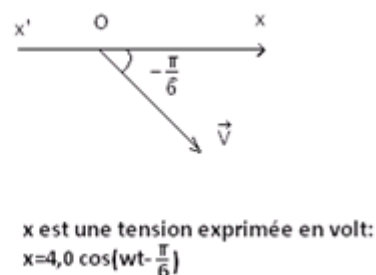


Fig. II 2 b.

3. Construction de Fresnel :

a. Déphasage :

Soient x_1 et x_2 deux fonctions sinusoïdales de même pulsation :

$$x_1 = a_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \text{ et } x_2 = a_2 \cos(\omega t + \varphi_2).$$

On appelle déphasage de x_2 sur x_1 ou différence de phase :

$$\phi = \varphi_2 - \varphi_1.$$

La représentation de Fresnel permet de lire immédiatement cette différence de phase ou déphasage.

Pour $\phi \in]-\pi, +\pi[$.

- Si $\phi > 0$, x_2 est en avance sur x_1 ;
- Si $\phi < 0$, x_2 est en retard sur x_1 .

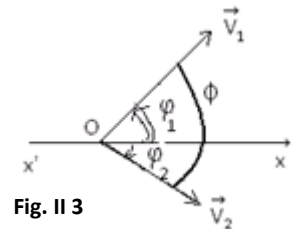


Fig. II 3

b. Valeurs particulière du déphasage :

- $\phi = 2k\pi, k \in \mathbb{Z}$: x_1 et x_2 sont en phase :

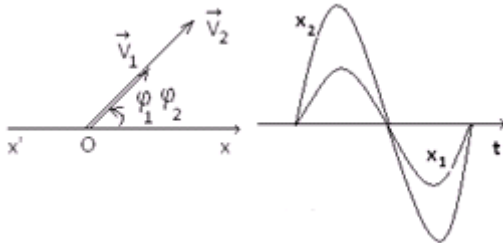


Fig. II 4 a

Fig. II 4 b

- $|\phi| = k\pi, k \in \mathbb{Z}$: x_1 et x_2 sont en opposition de phase :

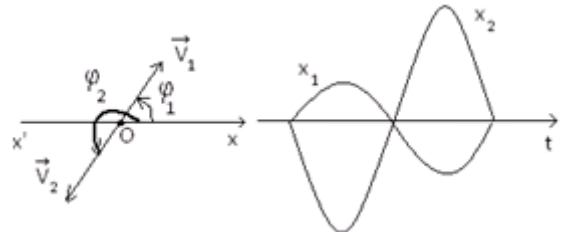


Fig. II 5 a

Fig. II 5 b

- $|\phi| = \frac{\pi}{2} + 2k\pi, k \in \mathbb{Z}$: x_1 et x_2 sont en quadrature de phase :

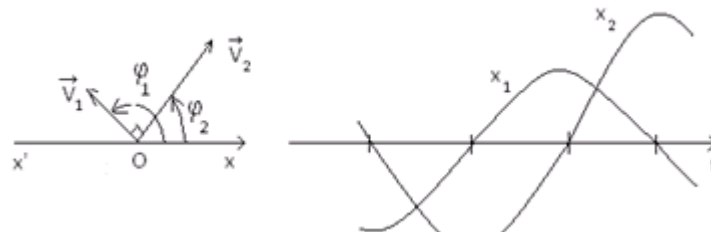


Fig. II 6 a

Fig. II 6 b

c. Somme de deux fonctions sinusoïdales de même pulsation :

Gardons les mêmes notations : $x_1 = a_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ et $x_2 = a_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$.

Recherchons : $x = x_1 + x_2$.

Si $a_1 \neq a_2$, les formules trigonométriques ne peuvent être utilisées. Utilisons la construction de Fresnel.

À la fonction x_1 , associons le vecteur de Fresnel $\vec{V}_1$ tel que : $\|\vec{V}_1\| = a_1$ et $(\vec{Ox}, \vec{V}_1) = \varphi_1$.

À la fonction x_2 , associons le vecteur de Fresnel $\vec{V}_2$ tel que : $\|\vec{V}_2\| = a_2$ et $(\vec{Ox}, \vec{V}_2) = \varphi_2$.

Soit le vecteur : $\vec{V} = \vec{V}_1 + \vec{V}_2$.

Les vecteurs $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$ tournent à la même vitesse angulaire ω . Le parallélogramme tracé tourne sans se déformer à la vitesse angulaire ω . Le vecteur $\vec{V}$ tourne donc également à la vitesse angulaire ω .

Soient H , H_1 et H_2 les projetés respectifs des extrémités de $\vec{V}$, $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$:

$$\overline{OH} = \overline{OH_1} + \overline{OH_2} = x_1 + x_2.$$

À la somme x , on peut donc associer le vecteur tournant :

$\vec{V} = \vec{V}_1 + \vec{V}_2$ qui tourne à la vitesse angulaire ω :

x est donc une fonction sinusoïdale de même pulsation ω : $x = a \cos(\omega t + \varphi)$.

Des méthodes graphique ou géométrique permettent de trouver a et φ .

$$OM^2 = OH^2 + MH^2; OM = a; OH_1 = a_1 \cos \varphi_1; OH_2 = a_2 \cos \varphi_2$$

$$MH = M_1H_1 + M_2H_2; M_1H_1 = a_1 \sin \varphi_1; M_2H_2 = a_2 \sin \varphi_2$$

$$a^2 = [a_1 \cos \varphi_1 + a_2 \cos \varphi_2]^2 + [a_1 \sin \varphi_1 + a_2 \sin \varphi_2]^2$$

$$= a_1^2 \cos^2 \varphi_1 + a_2^2 \cos^2 \varphi_2 + 2a_1 a_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + a_1^2 \sin^2 \varphi_1 + a_2^2 \sin^2 \varphi_2 + 2a_1 a_2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2$$

$$= a_1^2 (\cos^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_1) + a_2^2 (\cos^2 \varphi_2 + \sin^2 \varphi_2) + 2a_1 a_2 (\cos \varphi_2 \cos \varphi_1 + \sin \varphi_2 \sin \varphi_1)$$

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$\boxed{a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

$$\tan \varphi = \frac{MH}{OH} = \frac{a_1 \sin \varphi_1 + a_2 \sin \varphi_2}{a_1 \cos \varphi_1 + a_2 \cos \varphi_2}$$

$$\boxed{\tan \varphi = \frac{a_1 \sin \varphi_1 + a_2 \sin \varphi_2}{a_1 \cos \varphi_1 + a_2 \cos \varphi_2}}$$

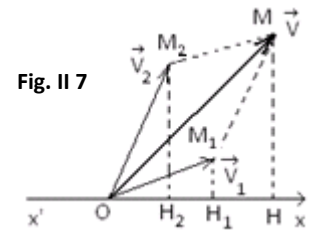


Fig. II 7

III DIPÔLES (RLC) SÉRIES EN RÉGIME SINUSOÏDAL FORCÉ

Classe 12^{ème} SE SB

Discipline : Physique

Objectifs :

- définir le courant alternatif sinusoïdal ;
- écrire les expressions des grandeurs alternatives sinusoïdales (intensité, tension instantanées) ;
- définir les grandeurs efficaces (intensité, tension efficaces) en fonction des grandeurs maximales ;
- écrire l'expression de la tension instantanée dans un circuit série constitué d'une résistance pure R, d'une inductance pure L, d'une capacité C, d'une résistance inductive R,L série, d'une résistance et d'une capacité RC, d'une résistance inductive et d'une capacité RLC, série ;
- établir les expressions de l'impédance et de la phase dans les circuits RL,RC et RLC série à partir de la méthode de Fresnel ;
- citer les conditions de la résonance ;
- tracer la courbe de la réponse en intensité ;
- définir la bande passante ;
- établir les expressions de la bande passante et du facteur de qualité ;
- donner la condition de surtension ;
- résoudre les problèmes d'oscillations électriques forcées.

I. Courant alternatif :

On appelle courant alternatif, un courant électrique périodique qui change de sens deux fois par période et transporte alternativement dans un sens et dans l'autre des quantités d'électricité égales.

II. Grandeurs alternatives sinusoïdales :

1. Intensité instantanée :

Le plus simple des courants alternatifs est le courant sinusoïdal. L'intensité instantanée est une fonction sinusoïdale du temps.

Avec un choix convenable de l'instant $t=0$, $i = I_m \cos \omega t$.

Où I_m est la valeur maximale de l'intensité (ou amplitude), $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ est la pulsation exprimé en rad/s.

2. Tension instantanée :

Lorsqu'une portion de circuit est parcourue par un courant, il existe entre ses extrémités une différence de potentielle encore appelée tension électrique.

Si le courant est sinusoïdal d'intensité $i = I_m \cos \omega t$, la tension est également sinusoïdale de même pulsation $u = U_m \cos(\omega t + \varphi)$.

Où U_m est la tension maximale, φ est le déphasage de la tension u sur l'intensité i .

3. Les effets du courant alternatif :

- ❖ **Effets chimiques :** Lorsqu'un courant traverse un électrolyte, des réactions chimiques se produisent aux électrodes de l'électrolyseur dont le bilan correspond à une électrolyse. Si le courant est alternatif, l'électrode qui est anode aux cours d'une alternance devient cathode pendant l'alternance suivante et vice versa. Il en résulte que l'effet chimique est nul dans un électrolyseur à anode soluble.

- ❖ **Effets thermiques** : Tout conducteur parcouru par un courant est le siège d'un dégagement de chaleur : c'est l'effet Joule.
L'énergie perdue est donnée par la loi de Joule : $W = Ri^2t$. l'effet Joule ne dépend pas du sens du courant.
- ❖ **Effets magnétiques** : un courant électrique crée un champ magnétique dans l'espace entourant le circuit qu'il parcourt.
Un conducteur parcouru par un courant placé dans un champ magnétique, subit l'action d'une force électromagnétique appelée force de Laplace.
Lorsque le courant est alternatif, le champ magnétique créé est alternatif, la force électromagnétique est également alternative.

4. Lois du courant alternatif :

- ❖ L'intensité i du courant alternatif est à chaque instant la même dans toutes les sections du circuit.
- ❖ Les lois du courant continu s'appliquent à chaque instant au courant alternatif.
- ❖ Contrairement au courant continu, le courant alternatif passe dans un circuit comportant un condensateur. Il peut produire des forces électromotrices (f.é.m.) dans son propre circuit comme dans le circuit voisin.

III. Grandeurs alternatives efficaces :

1. **Définition** : La valeur efficace G d'une grandeur variable $g(t)$, périodique du temps est, par définition, sa valeur quadratique moyenne. Cela signifie que G^2 est égale à la moyenne au cours du temps de $g^2(t)$.

2. **Intensité efficace** :

L'intensité instantanée est $i = I_m \cos \omega t$; I_m est l'amplitude de l'intensité.

Soit I l'intensité efficace. Par définition, I^2 est la valeur moyenne de $i^2(t)$:

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \cos^2 \omega t dt ; \cos^2 \omega t = \frac{1 + \cos 2\omega t}{2}.$$

$$\text{Il vient : } I^2 = \frac{I_m^2}{T} \left[\int_0^T \frac{dt}{2} + \int_0^T \frac{\cos 2\omega t}{2} dt \right], \int_0^T \frac{\cos 2\omega t}{2} dt = \frac{1}{4\pi} [\sin 2\omega t]_0^T = 0, \int_0^T \frac{dt}{2} = \frac{T}{2}$$

$$\text{Ainsi : } I^2 = \frac{I_m^2}{T} \cdot \frac{T}{2} = \frac{I_m^2}{2}.$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \text{ ou } I_m = I\sqrt{2}$$

3. **Tension efficace** :

Un calcul du même type peut être mené pour la tension.

$$\text{La tension efficace } U \text{ est donnée par : } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \text{ ou } U_m = U\sqrt{2}.$$

IV. Étude expérimentale d'un circuit RLC :

1. **Expérience** :

Branchons en série un conducteur ohmique de résistance r' , un condensateur de capacité C et une bobine d'inductance L et de résistance r . Fig. III 1.

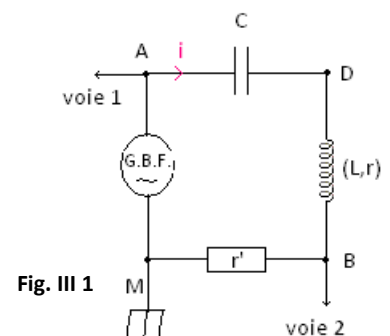


Fig. III 1

Aux bornes de ce circuit, un G.B.F. (Générateur de basse fréquence) impose une tension sinusoïdale de fréquence f réglable. La résistance totale du circuit est $R=r+r'$.

Un oscilloscope bicourbe permet de visualiser :

- ❖ Sur la voie 1, la tension $u_1 = u_{AM}$ imposée par le générateur ;
- ❖ Sur la voie 2, la tension $u_2 = u_{BM}$ aux bornes de la résistance r' .

Comme $u_{BM} = r'i$ nous observons sur la voie 2, un signal proportionnel à l'intensité i du courant dans le circuit $i = \frac{u_{BM}}{r'}$.

2. Résultats et interprétation :

Pour une fréquence f quelconque du G.B.F., il apparaît deux sinusoïdes de même période, d'amplitudes différentes et décalées l'une par rapport à l'autre. Fig. III 2.

Quelque soit la fréquence du G.B.F., les deux sinusoïdes ont toujours la même période, donc la même fréquence f . La fréquence de l'intensité du courant est égale à celle de la tension imposée par le générateur. Le circuit est le siège d'oscillations forcées.

Des deux fonctions u_1 et u_2 , la fonction qui est en avance de phase sur l'autre est celle qui passe la première par son maximum quand on se déplace dans le sens positif sur l'axe des temps.

$u_2 = r'i = r'I_m \cos \omega t$; $u_1 = U_m \cos(\omega t + \varphi)$; φ est le déphasage de u_1 sur u_2 donc de u_1 sur i

Le décalage horaire θ entre les deux sinusoïdes est tel

$$\text{que : } \omega\theta = |\varphi| \text{ or } \omega T = 2\pi \Rightarrow |\varphi| = \frac{2\pi}{T} \cdot \theta$$

Si $\varphi > 0$ u_1 est en avance sur u_2 , si $\varphi < 0$ u_1 est en retard sur u_2 .

En faisant varier la fréquence f tout en maintenant l'amplitude U_m constante, on constate que lorsque f augmente :

- ❖ l'amplitude de u_2 , ($r'I_m$) passe par un maximum lorsque la fréquence du générateur est égale à la fréquence propre du circuit RLC $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$: il y a résonance d'intensité.
- ❖ Le décalage entre les deux sinusoïdes varie ; il est nul à la résonance : u_1 et u_2 sont en phase (u_1 et i sont en phase).

3. Conclusions :

Un dipôle R,L,C série en oscillations forcées est traversé par un courant sinusoïdal dont la fréquence est celle de la tension imposée par le générateur.

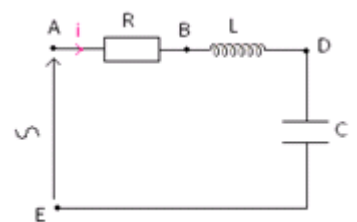
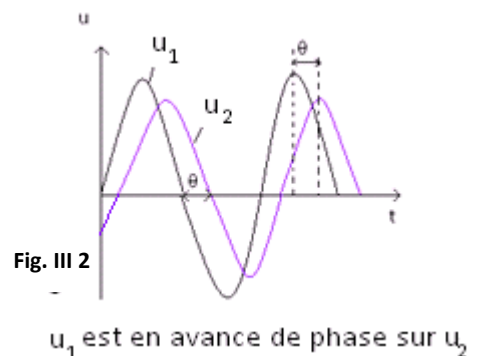
À la résonance, la tension imposée par le générateur et l'intensité du courant dans le circuit sont en phase.

V. Étude théorique-Loi d'Ohm :

1. Expression de la tension aux bornes du circuit RLC série:

Soit un circuit formé d'un conducteur ohmique de résistance R , d'une bobine purement inductive d'inductance L et d'un condensateur de capacité C montés en série. Fig. III 3.

Il est alimenté par une tension $u = u_{AE} = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi)$.



Il est parcouru par un courant $i = I\sqrt{2}\cos\omega t$.

Appliquons la loi des tensions aux valeurs instantanées :

$$u_{AE} = u_{AB}(t) + u_{BD}(t) + u_{DE}(t) \text{ ou } u = u_R + u_L + u_C$$

La loi d'Ohm pour chaque dipôle donne :

- conducteur ohmique : $u_{AB} = u_R = Ri$;
- bobine : $u_{BD} = u_L = ri - e = -\left(-L\frac{di}{dt}\right) = L\frac{di}{dt}$; ($r=0$)
- condensateur : $u_{DE} = \frac{q}{C}$, or $i = \frac{dq}{dt} \Rightarrow q = \int_0^t idt$ donc $u_{DE} = u_C = \frac{1}{C} \int_0^t idt$.

La loi des tensions devient : $u = u_{AE} = Ri + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t idt$.

- $i = I\sqrt{2}\cos\omega t$;
- $\frac{di}{dt} = -I\omega\sqrt{2}\sin\omega t$; or $-\sin\omega t = \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \Rightarrow \frac{di}{dt} = \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$;
- $\int_0^t idt = I\sqrt{2} \left[\frac{\sin\omega t}{\omega}\right]_0^t = \frac{I\sqrt{2}}{\omega} \sin\omega t$; or $\sin\omega t = \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$;
d'où $\int_0^t idt = \frac{I\sqrt{2}}{\omega} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$

$$\text{Ainsi : } U\sqrt{2}\cos\left(\omega t + \varphi\right) = RI\sqrt{2}\cos\omega t + L\omega I\sqrt{2}\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{I\sqrt{2}}{C\omega}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

En divisant par $\sqrt{2}$, l'équation régissant le circuit devient :

$$U \cos(\omega t + \varphi) = RI \cos\omega t + L\omega I \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{I}{C\omega} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

2. Expressions de l'impédance et de la phase :

À chacune des quatre fonctions sinusoïdales, associons

respectivement les vecteurs : $\vec{u}, \vec{u}_R, \vec{u}_L$ et $\vec{u}_C$. $\vec{u} = \vec{u}_R + \vec{u}_L + \vec{u}_C$.

Les vecteurs de Fresnel possèdent les caractéristiques suivantes :

$$\vec{u}(U, \varphi) = \vec{u}_R(RI, 0) + \vec{u}_L\left(L\omega I, \frac{\pi}{2}\right) + \vec{u}_C\left(\frac{I}{C\omega}, -\frac{\pi}{2}\right). \text{ Fig. III 4.}$$

L'exploitation géométrique du diagramme de Fresnel donne :

$$AE^2 = AB^2 + BE^2 = AB^2 + (BD - DE)^2$$

$$U^2 = (RI)^2 + \left(L\omega I - \frac{I}{C\omega}\right)^2 = I^2 \cdot \left[R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2\right]$$

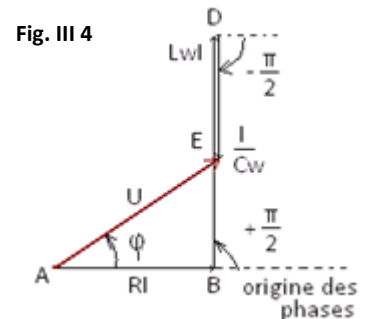
$$\tan\varphi = \frac{BE}{AB} = \frac{L\omega I - \frac{I}{C\omega}}{RI} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

D'où :

$$U = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} \times I = Z \cdot I$$

$$\tan\varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$ est l'impédance du circuit (en Ω), φ est le déphasage de la tension par rapport au courant.



Remarque importante :

- ❖ Si on choisit l'instant $t=0$ tel qu'à cet instant la phase du courant soit nulle, alors :

$$\begin{cases} i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cos \omega t \\ u(t) = U \cdot \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi) \end{cases}$$

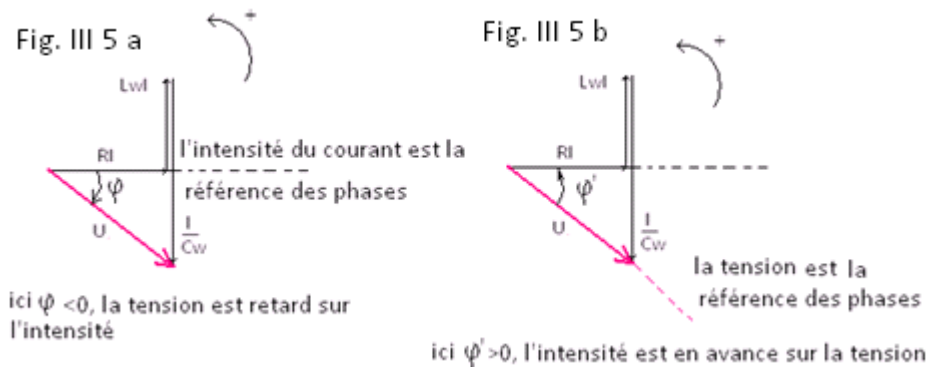
L'intensité du courant est la référence des phases, φ est le déphasage de u par rapport à i . Son signe est donné par le diagramme de Fresnel. (fig. III 5a).

- ❖ Si on choisit l'instant $t=0$ tel qu'à cet instant la phase de tension soit nulle, alors :

$$\begin{cases} u(t) = U \cdot \sqrt{2} \cos \omega t \\ i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi') \end{cases}$$

La tension est la référence des phases, φ' est le déphasage de i par rapport à u .

Le diagramme de Fresnel reste le même, seule l'origine des phases change (fig. III 5b). Le signe de φ' est donné par ce diagramme. On remarque que $\varphi = -\varphi'$.

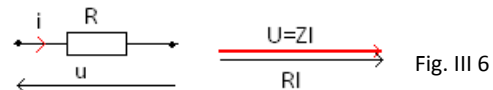


3. Application à quelques dipôles particuliers :

a. Dipôle purement résistif : Fig. III 6

$$\begin{cases} Z = R \\ \varphi = 0 \end{cases} \quad U = RI \Rightarrow \begin{cases} u = RI\sqrt{2}\cos\omega t \\ i = I\sqrt{2}\cos\omega t \end{cases}$$

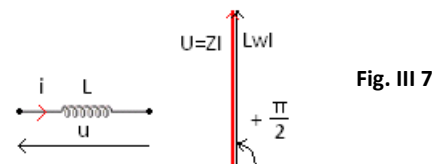
i et u sont en phase



b. Dipôle purement inductif: Fig. III 7.

$$\begin{cases} Z = L\omega \\ \varphi = +\frac{\pi}{2} \end{cases} \quad U = L\omega I \Rightarrow \begin{cases} u = L\omega I\sqrt{2}\cos\omega t + \frac{\pi}{2} \\ i = I\sqrt{2}\cos\omega t \end{cases}$$

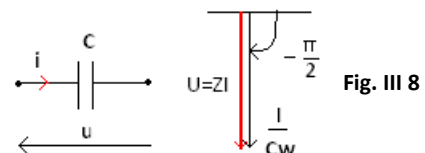
u est en avance sur i .



c. Condensateur : Fig. III 8

$$\begin{cases} Z = \frac{1}{C\omega} \\ \varphi = -\frac{\pi}{2} \end{cases} \quad U = \frac{I}{C\omega} \Rightarrow \begin{cases} u = \frac{I}{C\omega}\sqrt{2}\cos\omega t - \frac{\pi}{2} \\ i = I\sqrt{2}\cos\omega t \end{cases}$$

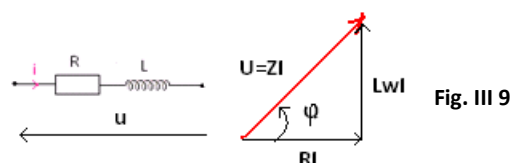
i est en avance sur u



d. Dipôle R, L série ou bobine R, L: Fig. III 9

$$\begin{cases} Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} \\ \tan\varphi = \frac{L\omega}{R} \end{cases}$$

u est en avance sur i



e. **Dipôle R, C série** : Fig. III 10.

$$\begin{cases} Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(C\omega)^2}} \\ \tan\varphi = -\frac{1}{RC\omega} \end{cases}$$

u est en retard sur i

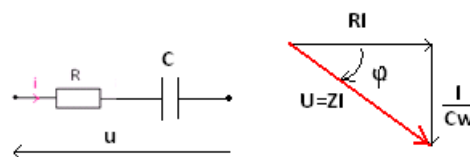


Fig. III 10

f. **Dipôle R, (L, r), C série** : Fig. III 11.

$$\begin{cases} Z = \sqrt{(R+r)^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2} \\ \tan\varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R+r} \end{cases}$$

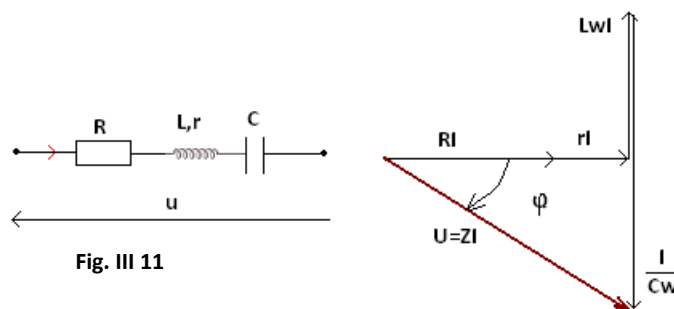


Fig. III 11

VI. Étude de la résonance d'intensité :

1. **Influence de ω , R, L et C sur la réponse :**

❖ Pour une valeur donnée de ω , U est proportionnel à I. $U=ZI=f(I)$ est une droite.

❖ Pour U fixé, $I =$

$$\frac{U}{\sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}} \text{ dépend de } \omega.$$

a. **Influence de ω sur la réponse :**

L'étude de la fonction $I=f(\omega)$

montre :

- un maximum pour $\omega = \omega_0$, tel que

$$L\omega_0 - \frac{1}{C\omega_0} = 0.$$

- si $\omega \rightarrow 0$; $I \rightarrow 0$

- si $\omega \rightarrow \infty$, $I \rightarrow 0$.

ω	0	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$+\infty$
$L\omega - \frac{1}{C\omega}$	-	0	+
I		$\frac{U}{R}$	

Tableau de variation

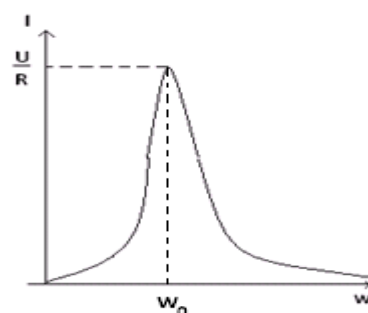


Fig. III 12

On retrouve un maximum correspondant à la résonance pour $LC\omega_0^2 = 1$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

La courbe est :(voir fig. III 12)

b. **Influence de R sur la réponse :**

Plus R augmente, plus I diminue : c'est l'effet d'amortissement. A la résonance, si $R \rightarrow 0$,

$I = \frac{U}{R} \rightarrow \infty$. La résonance est très aiguë pour le circuit non amorti.

c. **Influence de L et C sur la réponse :**

Selon la valeur de $L\omega$ et $\frac{1}{C\omega}$, l'effet inductif (relié à $L\omega$) l'emporte ou non sur l'effet capacitif (relié à $\frac{1}{C\omega}$).

❖ $L\omega < \frac{1}{C\omega} \Rightarrow \omega < \omega_0$, $\tan\varphi < 0 \Rightarrow \varphi < 0$. La tension est en retard de phase sur l'intensité. Le diagramme de Fresnel est : fig. III 13

L'effet capacitif l'emporte sur l'effet inductif.

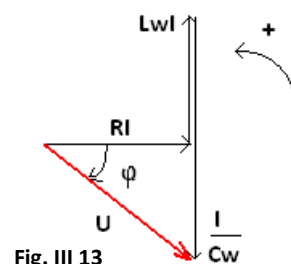


Fig. III 13

$$\diamond L\omega = \frac{1}{C\omega} \Rightarrow \omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \tan\varphi = 0 \Rightarrow \varphi = 0.$$

Il y a résonance. La tension et l'intensité sont en phase
L'effet capacitif compense l'effet inductif. Fig. III 14

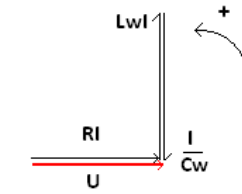


Fig. III 14

$$\diamond L\omega > \frac{1}{C\omega} \Rightarrow \omega > \omega_0, \tan\varphi > 0 \Rightarrow \varphi > 0.$$

La tension est en avance de phase sur l'intensité.
L'effet inductif l'emporte sur l'effet capacitif. Fig. III 15

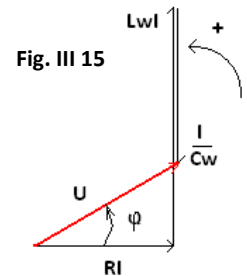


Fig. III 15

2. Bande passante-facteur de qualité :

a. Bande passante :

La bande passante est le domaine de fréquence pour lequel la réponse $I \geq \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$.

L'intensité efficace est :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}}; I_{max} = \frac{U}{R} \Rightarrow \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{U}{R\sqrt{2}}.$$

Cherchons les valeurs ω_1 et ω_2 définissant un intervalle pour lequel $I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$. fig.16

$$\frac{U}{\sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}} = \frac{U}{R\sqrt{2}} \Rightarrow \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2} = R\sqrt{2}$$

$$R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2 = 2R^2 \Rightarrow (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2 = R^2$$

$$\text{D'où : } L\omega - \frac{1}{C\omega} = \mp R$$

$$\omega_1 \text{ est tel que : } L\omega_1 - \frac{1}{C\omega_1} = -R \Rightarrow LC\omega_1^2 - 1 = -RC\omega_1 \quad (1)$$

$$\omega_2 \text{ est tel que : } L\omega_2 - \frac{1}{C\omega_2} = +R \Rightarrow LC\omega_2^2 - 1 = RC\omega_2 \quad (2).$$

En faisant (2) - (1), il vient :

$$LC(\omega_2^2 - \omega_1^2) = RC(\omega_2 + \omega_1) \Rightarrow LC(\omega_2 + \omega_1)(\omega_2 - \omega_1) = RC(\omega_2 + \omega_1)$$

$$\text{D'où : } \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{R}{L}.$$

Comme $\omega = 2\pi N$, on a $\Delta\omega = 2\pi\Delta N$, $\Delta N = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{R}{2\pi L}$, ΔN est la bande passante à 3db (décibels).

b. Facteur de qualité :

Le facteur de qualité est par définition le rapport de la fréquence à la résonance N_0 sur la bande passante ΔN .

$$Q = \frac{N_0}{\Delta N} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{\omega_0}{\frac{R}{L}} = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{RC\omega_0}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{RC\frac{1}{\sqrt{LC}}} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

$$\text{Ainsi : } Q = \frac{N_0}{\Delta N} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{RC\omega_0} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

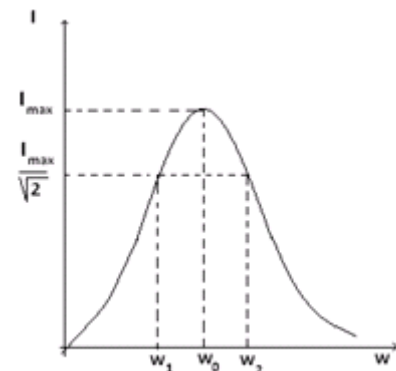


fig.16

Le facteur de qualité décroît lorsque R augmente. Plus le circuit est amorti, plus le facteur de qualité est faible.

c. Surtension à la résonance :

À la résonance : $U_L = L\omega_0 I_0$ et $U_C = \frac{I_0}{C\omega_0}$, $I_0 = \frac{U}{R}$.

$U_L = \frac{L\omega_0}{R} \times U = QU$ et $U_C = \frac{1}{RC\omega_0} \times U = QU$.

Ainsi à la résonance : $\boxed{U_L = U_C = QU}$

Dans un circuit peu amorti (R est faible), lorsque la résonance est aiguë, la tension aux bornes des appareils constituant le circuit peut être très supérieure à la tension d'alimentation : c'est le phénomène de surtension. Le facteur de qualité Q est aussi appelée facteur de surtension.

IV ÉNERGIE ÉLECTRIQUE-PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF SINUSOÏDAL

Classe 12^{ème} SE SB

Discipline : Physique

Objectifs :

- établir l'expression de la puissance moyenne et en déduire l'expression de la puissance apparente ;
- dire l'importance du facteur de puissance ;
- établir l'énergie totale emmagasinée à la résonance par le condensateur et la bobine.

I. Puissance :

1. Puissance instantanée :

Soit un dipôle alimenté par la tension sinusoïdale $u = U\sqrt{2}\cos(\omega t + \varphi)$ et parcouru par le courant $i = I\sqrt{2}\cos \omega t$.

La puissance instantanée est :

$$p(t) = u \times i = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi) \times I\sqrt{2} \cos \omega t \\ = 2UI \cos \omega t \cos(\omega t + \varphi)$$

Les relations trigonométriques conduisent à :

$$\cos \omega t \cos(\omega t + \varphi) = \frac{1}{2} [\cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi].$$

La puissance instantanée est donc :

$$p(t) = UI \cos(2\omega t + \varphi) + UI \cos \varphi$$

C'est une fonction périodique de fréquence $2N$, qui oscille autour de $UI \cos \varphi$. Fig. IV 1

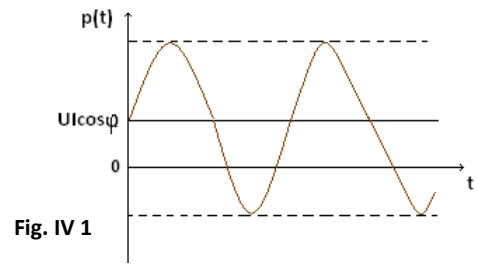


Fig. IV 1

2. Puissance moyenne :

a. **Définition :** La puissance moyenne est l'énergie moyenne consommée par un circuit par unité de temps.

b. Expression :

Pendant une durée élémentaire dt , le dipôle consomme l'énergie élémentaire : $dw(t)=p(t).dt$

Entre les instants 0 et t_0 , l'énergie totale consommée est la somme des énergies élémentaires, soit :

$$W = \int_0^{t_0} dW = \int_0^{t_0} p(t) dt$$

Le calcul donne :

$$\int_0^{t_0} p(t) dt = \int_0^{t_0} UI \cos(2\omega t + \varphi) dt + \int_0^{t_0} UI \cos \varphi dt$$

Le calcul de $\int_0^{t_0} UI \cos(2\omega t + \varphi) dt$ est fait en considérant que t_0 est grand devant la période T des oscillations. $t_0 = nT + \epsilon$. n est entier et ϵ est petit par rapport à nT .

$$\int_0^{t_0} UI \cos(2\omega t + \varphi) dt = \int_0^{nT} UI \cos(2\omega t + \varphi) dt = \frac{UI}{2\omega} [\sin(2\omega t + \varphi)]_0^{nT}$$

$$\int_0^{t_0} UI \cos(2\omega t + \varphi) dt = \frac{UI}{2\omega} [\sin(2\omega nT + \varphi) - \sin \varphi],$$

$$\text{Or } \omega T = 2\pi \Rightarrow \sin(\varphi + 4\pi n) = \sin \varphi \Rightarrow \int_0^{t_0} UI \cos(2\omega t + \varphi) dt = 0$$

$$\text{Pour le second terme: } \int_0^{t_0} UI \cos \varphi dt = UI \cos \varphi \cdot t_0$$

Ainsi l'énergie consommée par le circuit est : $W = UI \cos \varphi \cdot t_0$

La puissance moyenne P consommée par le circuit est :

$$P = \frac{W}{t_0} = UI \cos \varphi, \quad U \text{ en Volt, } I \text{ en Ampère et } P \text{ en Watt.}$$

Le terme UI est la **puissance apparente**, qui s'exprime en volt-ampère (V.A).

Le terme $\cos \varphi$ est le **facteur de puissance** du circuit.

3. Puissance moyenne absorbée par des dipôles idéaux :

a. **Conducteur Ohmique** : $\varphi = 0 \Rightarrow \cos \varphi = 1$, d'où $P_R = UI = RI^2$

b. **Condensateur parfait** : $\varphi = -\frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos \varphi = 0$, d'où $P_C = 0$

Le condensateur restitue pendant une demi-période l'énergie qu'il a accumulée pendant la demi-période précédente. La puissance moyenne est nulle.

c. **Bobine non résistive** : $\varphi = +\frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos \varphi = 0$, d'où $P_L = 0$

L'énergie magnétique accumulée pendant une demi-période est là aussi restituée pendant la demi-période suivante. La puissance moyenne est nulle.

d. **dipôle RLC série** : $\varphi \neq 0 \Rightarrow \cos \varphi = \frac{R}{Z} \Rightarrow P_{RLC} = UI \cos \varphi = UI \cdot \frac{R}{Z}$.

$$\text{Or } U = ZI \Rightarrow P_{RLC} = RI^2.$$

L'énergie moyenne consommée résulte uniquement de l'effet Joule.

4. Amélioration de $\cos \varphi$:

En régime permanent, la puissance moyenne consommée par une usine est constante. Les moteurs des usines contiennent des bobinages : la tension est en avance de phase sur l'intensité. $\varphi > 0$.

$$P = UI \cos \varphi. \quad \text{L'intensité du courant dans le circuit de l'usine est } I = \frac{P}{UI \cos \varphi}.$$

Cette intensité sera, pour P et U données, d'autant plus faibles que $\cos \varphi$ sera proche de l'unité, donc que φ est proche de zéro.

$$\text{Les pertes d'énergies en ligne correspondent à une puissance : } P_0 = rI^2 = \frac{rP^2}{U^2 \cos^2 \varphi}.$$

Cette puissance ne sert qu'à chauffer l'atmosphère. Il est donc intéressant de la minimiser.

Lors du transport de l'énergie électrique sur les lignes, il faut augmenter la tension.

Dans une usine, on peut augmenter $\cos \varphi$ à l'aide de condensateurs qui compenseront plus ou moins les effets de l'inductance.

Les condensateurs sont coûteux, aussi, l'industriel a le choix entre engager des dépenses ou payer des taxes supplémentaires au distributeur (au Mali EDM, qui pénalise en cas de $\cos \varphi < 0,8$).

II. Énergie consommée par un dipôle RLC série :

1. Énergie consommée par un dipôle RLC série :

$$\text{La tension aux bornes du dipôle RLC est } u = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C}.$$

$$\text{L'énergie emmagasinée dans la bobine et dans le condensateur est : } E = \frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}.$$

$$\text{La dérivée de } E \text{ par rapport au temps est } \frac{dE}{dt} = Li \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} \frac{dq}{dt} = Li \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} i.$$

D'où $dE = i \left(L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} \right) dt$. Or $L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} = u - Ri \Rightarrow dE = uidt - Ri^2 dt$.

- $uidt$ est fournit pendant la durée dt .
- $Ri^2 dt$ est l'énergie consommée par effet joule ;
- dE est la variation de l'énergie emmagasinée.

Ainsi : $uidt = Ri^2 dt + dE$. Cette équation traduit la conservation de l'énergie.

2. Échange d'énergie :

Désignons par $P_1 = u.i$ la puissance instantanée délivrée par le générateur ; et par $P_2 = Ri^2$ la puissance instantanée consommée dans la résistance R du circuit.

À la résonance d'intensité, ces deux puissances sont égales : $P_1 = P_2$. Le générateur compense à chaque instant les pertes d'énergies par effet joule dans la résistance R .

Lorsque la fréquence f du générateur est différente de la fréquence à la résonance f_0 , $P_1 \neq P_2$.

La puissance P_2 dissipée dans la résistance est toujours positive. En revanche la puissance P_1 délivrée par le générateur peut être positive ou négative.

À un certain instants, le générateur reçoit ($P_1 < 0$) de l'énergie du circuit, celle-ci provenant de l'énergie emmagasinée dans le condensateur ou dans la bobine.

En moyenne, sur une période, la puissance moyenne fournit par le générateur est toujours égale à la puissance moyenne dissipée dans la résistance : $P_1 = P_2$, d'où :

$$UI \cos \varphi = RI^2.$$

3. Énergie à la résonance :

L'énergie emmagasinée dans la bobine et dans le condensateur est : $E = \frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$.

En moyenne lorsque le régime sinusoïdal est établi, E reste constante. La variation de l'énergie emmagasinée est nulle.

À la résonance l'énergie maximale emmagasinée dans le condensateur peut être très grande compte tenu du phénomène de surtension. Il en est de même pour l'énergie maximale emmagasinée dans la bobine.

Chapitre 6 : Physique atomique et nucléaire.

I EFFET THERMOELECTRONIQUE

Classe 12^{ème} SE

Discipline : Physique

Objectifs :

- définir une diode et donner son principe de fonctionnement ;
- définir l'effet thermoélectronique ;
- interpréter l'effet thermoélectronique ;
- tracer la caractéristique d'une diode ;
- citer quelques applications pratiques de la diode ;
- décrire une triode.

I Description de la diode thermoélectronique

1. Définition :

Une diode est un tube électronique à deux électrodes.

2. Description :

C'est un tube en verre où l'on a fait un vide poussé contenant :

- un filament F en tungstène porté à l'incandescence par effet joule au moyen d'un circuit de chauffage,
- une plaque métallique P, en forme de cylindre entourant le filament.

Un circuit dénommé circuit plaque établit une d.d.p. $V_P - V_F$ entre la plaque et le filament.

Le vide entre le filament et la plaque constitue un isolant. Si un courant est observé, c'est dû au départ d'électrons du filament pour la plaque.

II Caractéristique de la diode thermoélectronique

- Si le filament est à la température ambiante, aucun courant n'est observé.
- Si le filament est porté à l'incandescence, on ne décèle aucun courant si la tension plaque est nulle (circuit plaque ouvert) ou si elle est négative ($V_P - V_F < 0$). Par contre, si $V_P - V_F > 0$, l'ampèremètre décèle un courant.

La diode n'est traversée par un courant que si le filament est chaud et la tension plaque ($V_P - V_F$) positive.

- Si pour une température donnée du filament, on fait varier la tension $U = V_P - V_F$, le courant thermoélectronique croît d'abord rapidement, puis devient pratiquement constante. On dit qu'on a obtenu le **courant de saturation**.
- Si on fait varier la température du filament et à chaque valeur de la température, la tension plaque, on obtient toujours un courant de saturation, mais qui augmente avec la température du filament.

La courbe de I en fonction de la tension ($V_P - V_F$) à une température donnée du filament, représente la caractéristique de la diode. Fig. I 2.

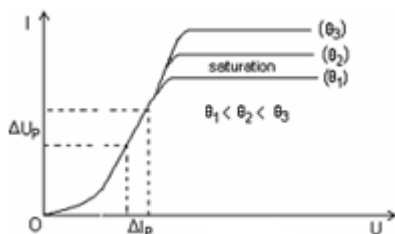


Fig. I 2

Elles montrent que l'intensité du courant plaque est d'abord faible puis, elle croît rapidement (voir partie rectiligne de la courbe fig. I 2) avant de tendre asymptotiquement vers une valeur limite I_s , appelée courant de saturation.

Sur la partie rectiligne, on a : $\Delta U_p = R \cdot \Delta I_p$ où R est la résistance interne de la diode.

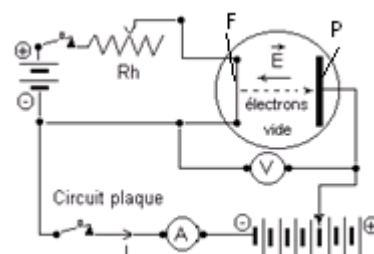


Fig. I 1

III Interprétation de l'effet thermoélectronique :

La chaleur augmente l'agitation des électrons, c'est à dire, leur énergie cinétique, et leur permet de s'échapper du métal en nombre croissant au fur et à mesure que la température s'élève.

On appelle effet thermoélectronique, l'émission d'électrons par un métal porté à l'incandescence.

Si la tension plaque est négative : $V_P - V_F < 0$, $V_P < V_F$, la plaque chargée négativement repousse les électrons qui sortent du filament : aucun courant ne passe.

Si elle est positive ($V_P > V_F$), la plaque chargée positivement les attire. Le circuit plaque est traversé par un courant.

IV Applications de la diode thermoélectronique :

La diode thermoélectronique peut être utilisée comme redresseur de courant alternatif en supprimant une alternance sur deux.

Dans les canons à électrons des tubes électroniques (téléviseurs, lampes radio, oscilloscopes, etc.).

En interposant une électrode supplémentaire entre le filament et la plaque portée à des potentiels variables, on obtient un tube électronique à électrode multiple appelé triode, concurrencée par les transistors.

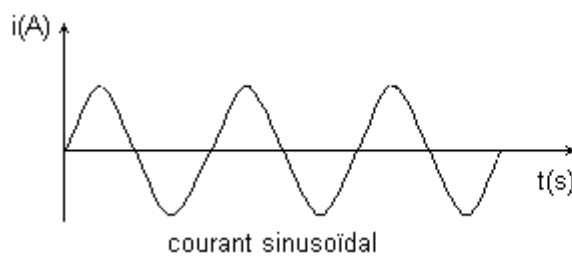


Fig. 13 a

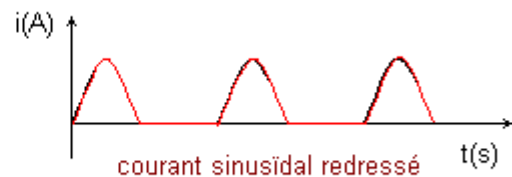


Fig. 13 b

II Effet photoélectrique

Classe : 12^{ème} SE, SB

Discipline : Physique

Objectifs : L'élève doit être capable de :

- décrire l'expérience de Hertz ; définir l'effet photoélectrique ;
- énoncer les lois de l'effet photoélectrique ;
- définir le courant de saturation et le potentiel d'arrêt ;
- tracer la caractéristique d'une cellule photoélectrique ;
- définir le photon ;
- interpréter l'effet photoélectrique ;
- définir et exprimer le rendement quantique d'une cellule ;
- citer quelques applications pratiques de l'effet photoélectrique.

1. Mise en évidence :

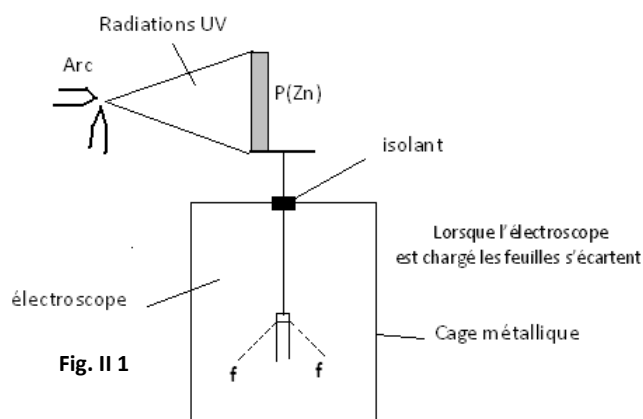
a. Expérience de Hertz :

Réalisons le montage suivant : Fig. II 1.

Electrisonons le conducteur formé par la plaque de zinc et l'électroscope, puis éclairons la plaque avec une source émettant une lumière riche en radiations ultraviolettes.

- Si la charge électrique du conducteur est positive, l'illumination ne produit aucun changement dans l'écartement des feuilles de l'électroscope ; le conducteur reste donc chargé.
- Par contre, si la charge est négative, les feuilles retombent rapidement, preuve que le conducteur plaque électroscope se décharge.

Electrisonons de nouveau ce conducteur négativement, puis éclairons la plaque après avoir interposé entre elle et la source une lame de verre qui absorbe l'ultraviolet : la décharge n'a plus lieu. Ces observations montrent qu'une plaque de zinc électrisée négativement se décharge quand elle reçoit des radiations ultraviolettes. On en déduit que les radiations ultraviolettes expulsent des électrons du métal.



b. Définition :

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un métal qui reçoit de l'énergie rayonnante.

2. L'hypothèse des photons :

Pour qu'un électron soit expulsé d'un métal, il doit absorber une énergie rayonnante W au moins égale à un certain travail d'extraction W_0 . Si $w > w_0$ la différence se trouve dans l'énergie cinétique : $E_c = \frac{1}{2}mv^2 = w - w_0$

Cet échange d'énergie ne peut s'expliquer à partir de la théorie électromagnétique de la lumière. Einstein suggéra l'hypothèse des photons.

« L'énergie transportée par une radiation de fréquence ν a une structure discontinue : elle est répartie en « grain » ou photons, transportant chacun le même quantum d'énergie $w = h\nu$ égale au produit de fréquence ν par la constante de Planck h ».

Si $w < w_0$ l'électron n'est pas absorbé.

Si $w > w_0$ l'électron est expulsé du métal.

Par contre si $w = w_0$ aucun électron n'est émis, d'où l'existence d'une fréquence limite ν_0 donnée par $w_0 = h\nu_0$.

3. Etude d'une cellule photoémissive. Fig. II 2.

a. **Description** : La cellule photoémissive comporte :

- Une cathode C, formée par une couche de métal pur ;
- Une anode A, réduite à un fil métallique.

La cellule est éclairée par une radiation monochromatique dont on peut faire varier l'intensité et la fréquence ν .

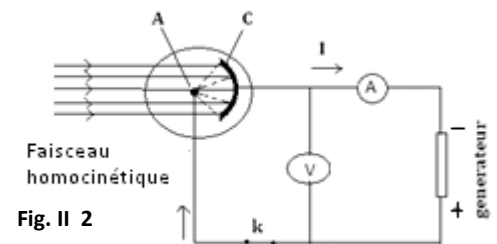


Fig. II 2

b. **Influence de la tension U_{AC}** :

Traçons la caractéristique intensité – tension en fixant la fréquence ν et la puissance P de la radiation arrivant sur C. Fig. II 3.

✓ Pour $U_{AC} < 0$: le champ électrique créé entre les électrodes contribue à repousser les électrons de A.

Si $U_{AC} < -U_0$, tous les électrons émis sont repoussés. U_0 est le potentiel d'arrêt.

✓ Pour $U_{AC} > 0$: le champ électrique créé entre les électrodes contribue à attirer les électrons vers A.

Si $U_{AC} > U_s$: la tension est suffisante pour guider vers A tous les électrons émis par C, il en résulte dans le circuit un courant de saturation $I_s = ne$, où n est le nombre d'électrons émis par seconde.

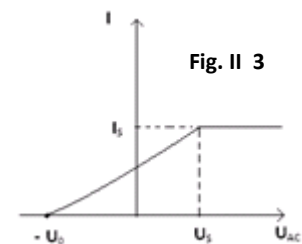


Fig. II 3

c. **Influence de la puissance P**

La puissance reçue dépend du nombre N de photons captés par seconde par la cathode : $P = Nh\nu$.

Augmenter P revient à augmenter N et à accroître le nombre de rencontre photons-électrons.

L'intensité du courant de saturation I_s augmente. Fig. II 4.

Le rendement quantique est le rapport du nombre n d'électrons par le nombre N de photons : $\eta = \frac{n}{N}$

a. **Influence de la fréquence** :

Lorsque $U_{AC} = -U_0$, les électrons sont émis de la cathode C avec l'énergie cinétique maximale E_C et atteignent A avec une vitesse nulle.

D'après le théorème de l'énergie cinétique entre C et A : $0 - E_C = q \cdot U_{CA}$.

Or $U_{CA} = -U_{AC} = U_0$ et $q = -e$ (charge de l'électron).

On a $-E_C = -eU_0$ ou $E_C = eU_0$.

Pour une radiation de fréquence ν l'énergie cinétique maximale de l'électron est :

$$E_C = W - W_0 = h\nu - h\nu_0 = h(\nu - \nu_0) \Rightarrow U_0 = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0)$$

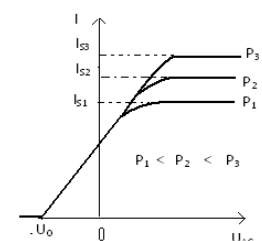


Fig. II 4

4. Les lois de l'effet photoélectrique :

- Pour un métal pur, l'émission photoélectrique ne se produit que si la fréquence ν de la radiation excitatrice est supérieure à une limite ν_0 , caractéristique du métal. Il revient au même de dire que la longueur d'onde doit être inférieure à une longueur d'onde limite λ_0 ($\lambda_0 = c/\nu_0$) qui caractérise le seuil d'excitation.
- L'intensité photoélectrique est proportionnelle à la puissance rayonnante reçue par le métal
- L'énergie cinétique maximale des électrons qui sortent du métal est indépendante de la puissance rayonnante reçue par le métal est fonction croissante de la fréquence de radiation.

5. Application : l'effet photoélectrique est utilisé dans les cellules et les photomultiplicateurs pour l'intensité lumineuse.

III Niveau d'énergie dans l'atome d'hydrogène.

Classe : 12^{ème} SE, SB

Discipline : Physique

Objectifs : l'élève doit être capable de :

- définir une raie, un spectre, une transition, un niveau d'énergie ;
- citer les types de spectres
- calculer l'énergie de transition ;
- calculer la longueur d'onde d'une raie émise ou absorbée ;
- écrire l'expression des niveau d'énergie ;
- tracer le diagramme énergétique ;
- citer les différentes séries de raies (Balmer, Lyman, Paschen, Brackett et Pfund).

I Les spectre de raies :

1. La spectroscopie :

La spectroscopie est une méthode qui consiste en l'analyse de rayonnement à l'aide d'appareils spectroscopes (ou spectromètres) utilisant des prismes ou réseaux.

On distingue :

- les spectres d'émission : analyse de la lumière émise par une source lumineuse ;
- les spectres d'absorption : analyse de la lumière initialement blanche, après qu'elle ait traversé la substance à étudier.

Le spectre est formé de traits parallèles, colorés ou spectre de raies.

Des mesures précises montrent que :

- les longueurs d'ondes des raies composant le spectre du rayonnement émis par différentes sources contenant le même type d'atomes sont caractéristiques de cet atome.
- Les longueurs d'ondes des raies d'émission sont rigoureusement égales à celles manquant dans le spectre d'absorption de la même substance.

Un spectre de raies (émission ou absorption) permet de détecter la présence d'un atome dans la source ou dans le milieu absorbant.

2. Quantification de l'énergie :

Pour expliquer l'existence des spectres de raies, Niels Borh introduit l'hypothèse de la quantification de l'énergie :

L'énergie d'un atome ne peut prendre qu'un certain nombre de valeurs discontinues croissantes : $E_1, E_2, \dots, E_p, \dots, E_n$ appelés niveau d'énergie.

Définition : Les états correspondant aux valeurs particulières d'énergie d'un atome sont appelés niveaux d'énergie de cet atome.

Les valeurs possibles de l'énergie d'un atome dépendent du choix de l'état de référence. L'état de référence choisi correspond au noyau séparé de tous les électrons.

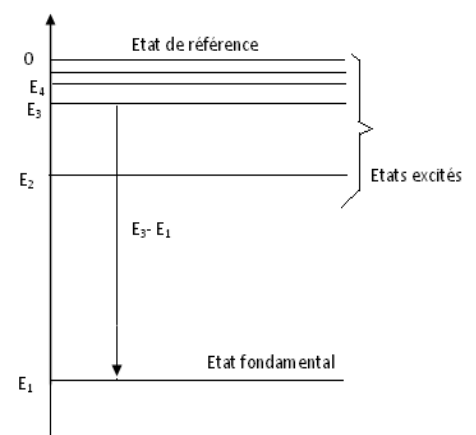


Fig. III 1

L'atome est un système lié composé d'un noyau et d'électrons. Pour amener l'atome dans son état initial à l'état de référence, il faut lui fournir de l'énergie : avec l'état de référence choisi, l'énergie de l'atome est négative.

L'énergie minimale, notée E_1 correspond à l'état stable ou état fondamental. Les autres états sont appelés états excités.

3. Transitions

Une transition, ou passage d'un niveau d'énergie à un autre, est représentée sur le diagramme par une flèche.

Pour passer directement d'un niveau d'énergie E_p à un niveau d'énergie supérieur E_n , un atome doit recevoir une quantité d'énergie bien définie appelées quantum d'énergie égale à $E_n - E_p$. Cette énergie peut être acquise par absorption d'un photon et d'un seul.

Pour passer directement d'un niveau d'énergie E_n à un niveau d'énergie inférieur E_p , le quantum d'énergie $E_n - E_p$ est émis.

II Cas de l'atome d'hydrogène : Fig. III 2.

L'atome d'hydrogène ne comporte qu'un électron.

L'état de référence correspond à l'électron infiniment éloigné d'un noyau (l'infini à l'échelle atomique correspond à quelque μm).

Les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène vérifient la relation : $E_n = -\frac{E_0}{n^2}$, où n est un nombre entier et E_0 est une constante. $E_0 = 13,6 \text{ eV}$. L'état de référence correspond à n infini. $E_\infty = 0$.

L'énergie de l'état fondamental est : $E_n = -\frac{E_0}{1^2} = -13,6 \text{ eV}$.

L'énergie du premier état excité est : $E_n = -\frac{E_0}{2^2} = -3,4 \text{ eV}$.

Pour d'autres états excités :

$$E_n = -\frac{E_0}{3^2} = -1,51 \text{ eV} ; E_n = -\frac{E_0}{4^2} = -0,85 \text{ eV}.$$

$$E_n = -\frac{E_0}{5^2} = -0,54 \text{ eV}.$$

Lors d'une transition de niveau E_n à un niveau inférieur E_p , le photon d'énergie $E_{n,p}$ est émis :

$$E_{n,p} = h\nu_{n,p} = E_n - E_p ; \text{ puisque } E_n = -\frac{E_0}{n^2}, \text{ et } E_p = -\frac{E_0}{p^2},$$

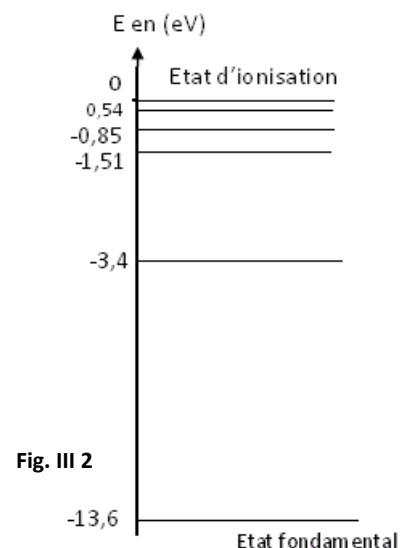
$$E_{n,p} = h\nu_{n,p} = -\frac{E_0}{n^2} + \frac{E_0}{p^2} = E_0 \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ or } E_{n,p} = h\nu_{n,p} = \frac{h.c}{\lambda_{n,p}}.$$

$$\text{Ainsi : } E_{n,p} = h\nu_{n,p} = \frac{h.c}{\lambda_{n,p}} \Rightarrow \frac{1}{\lambda_{n,p}} = \frac{E_0}{h.c} \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

$$R_H = \frac{E_0}{h.c} = 1,0965 \text{ m}^{-1} \text{ est une constante.}$$

Série de Balmer : Ce sont toutes les transitions du niveau d'énergie supérieur E_n vers un niveau d'énergie E_2 . Les longueurs d'onde vérifient la loi : $\frac{1}{\lambda_{n,2}} = \frac{E_0}{h.c} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$.

Série de Lyman : transition de $n > 1$ vers $n=1$; **série Paschen** : transition de $n > 3$ vers $n=3$; **série Brackett** : transition de $n > 4$ vers $n=4$; **série Pfund** : transition de $n > 5$ vers $n=5$.



Energie d'ionisation : L'énergie d'ionisation E_i est l'énergie minimale qu'il faut fournir à l'atome d'hydrogène dans l'état fondamental pour lui arracher son seul électron et donc l'amener à l'état de référence.

$$E_i - E_1 = 0 \text{ ou } E_i = E_1.$$

Lorsque l'énergie du photon est supérieure à l'énergie d'ionisation, l'électron acquiert la différence sous forme d'énergie cinétique. $E = E_i + E_1$.

IV LES RAYONS X

Classe : 12eme SB et SE

Discipline : Physique

Objectifs :

- définir les rayons X,
- décrire le mécanisme d'émission des rayons X ;
- donner la longueur d'onde du rayonnement émis ;
- donner des applications des rayons X.

I. Production :

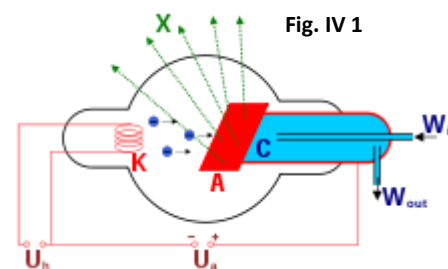
1. Schéma du montage et description :

La première véritable source de rayon x est le tube Crookes. Le tube de Crookes fut amélioré par William Coolidge. Le **tube de Coolidge**, encore appelé **tube à cathode chaude**, est le tube le plus largement utilisé. C'est un tube sous vide poussé (env. 10^{-4} Pa), recouvert d'une enceinte plombée.

Dans le tube de Coolidge, les électrons sont émis par un filament de tungstène (K) chauffé par un courant électrique. Le filament constitue la cathode du tube. La haute tension est établie entre la cathode et l'anode, ce qui accélère les électrons émis par le filament. Ces électrons viennent frapper l'anode.

Schéma de principe d'un tube de Coolidge à fenêtre latérale :

- K : filament
- A : anode
- W_{in} et W_{out} : entrée et sortie de l'eau de refroidissement



2. Nature des rayons X :

Les **rayons X** sont une forme de rayonnement

électromagnétique à haute fréquence (courte longueur d'onde) constitué de photons dont la longueur d'onde est comprise approximativement entre 5 pm et 10 nm. L'énergie de ces photons va de quelques eV (électronvolt), à plusieurs dizaines de MeV.

3. Mécanisme d'émission :

Les électrons sont extraits d'une cathode (K) de tungstène chauffée, accélérés par une tension électrique dans un tube sous vide, ce faisceau sert à bombarder une cible métallique (appelée anode ou anticathode) ; le ralentissement des électrons par les atomes de la cible provoque un rayonnement continu.

Un électron de masse m arrive sur l'anticathode avec une vitesse v , donc avec une énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2}mv^2$. Si dans la plupart des cas, l'électron est simplement freiné et son énergie cinétique transformée en chaleur, dans d'autres une fraction de cette énergie est utilisée par les couches électroniques des atomes du métal rencontrés. Le retour sur des couches plus stables des électrons s'accompagne d'une émission de photons.

Un photon x expulsé peut emporter au maximum la totalité de l'énergie incidente :

$$h\nu \leq \frac{1}{2}mv^2.$$

La longueur d'onde est $\lambda = \frac{c}{\nu} \Rightarrow \frac{hc}{\lambda} \leq \frac{1}{2}mv^2$ d'où : $\lambda \geq \frac{2hc}{mv^2}$. Or l'électron a acquis sa vitesse

parce qu'il a été accéléré par une tension U . Par suite : $\frac{1}{2}mv^2 = eU$. Ainsi : $\boxed{\lambda \geq \frac{hc}{eU}}$.

II. Propriétés et applications :

1. Propriétés principales :

a. Excitation des fluorescences :

Les rayons x sont invisibles, mais certaines substances placées sur leur trajet dans l'obscurité deviennent fluorescentes. Ainsi le platino-cyanure de baryum présente une couleur verte, le sulfure de zinc devient vert.

b. Ionisation des gaz :

Un faisceau de rayon x dirigé sur un électroscope chargé positivement ou négativement, fait retomber les feuilles. En effet, il rend l'air conducteur, les atomes étant transformés en ions positifs ou négatifs. Les plaques de l'électroscope attirent sur elle les ions de signe contraire à sa charge et les fixe, revenant à l'état neutre. Les rayons X sont des radiations ionisantes.

c. Propriétés photochimiques :

Les rayons x impressionnent les émulsions photographiques.

d. Effet photoélectrique :

Il est particulièrement intense sous les rayons x.

e. Propagation rectiligne et absorption :

Les rayons x traversent aisément de nombreux corps qui arrêtent la lumière : bois, carton, matière plastiques, métaux de couches minces. Mais des expériences ont montrés qu'ils sont eux-mêmes arrêtés par des épaisseurs suffisantes de plomb, ou d'autres métaux lourds.

Les rayons x se propagent en ligne droite.

2. Applications :

a. Applications médicales et industrielles :

Ces applications font surtout intervenir la transparence aux rayons x des substances qui sont opaques à la lumière.

- L'intensité du faisceau croît en progression géométrique quand l'épaisseur traversée croît en progression arithmétique.
- L'absorption est atomique.
- L'absorption est d'autant plus grande que le numéro atomique de l'élément absorbant est plus élevé.

On applique ces lois en radioscopies et en radiographie.

Les tissus musculaire, sanguin, nerveux,... qui contiennent des atomes de faible masse atomiques (C, H, O, N...) sont beaucoup plus transparents. Les tissus osseux dans lesquels on trouve $^{31}_{15}\text{P}$; $^{40}_{20}\text{Ca}$ sont moins transparents. Le squelette se détache sur l'écran.

L'industrie applique les méthodes analogues au contrôle de pièces usinées, assemblées ou fondues, les cassures, les failles sont ainsi décelées, chaque cavité apparaissant par une tache claire.

b. Applications scientifiques :

Elles exploitent les propriétés électromagnétiques des rayons x.

- **Spectroscopie** : les spectres sont généralement plus simples.
- **Diffraction** : les figures de diffraction permettent de reconstituer l'architecture du cristal (cristallographie).

V LE NOYAU ATOMIQUE

Classe 12^{ème} SE, SB

Discipline : Physique

Objectifs : L'élève doit être capable de :

- définir le noyau atomique ;
- définir un nucléon ;
- définir les isotopes et citer des exemples ;
- calculer la masse d'un noyau atomique ;
- définir un nucléide stable, un nucléide instable et citer des exemples ;
- définir l'unité de masse atomique ;
- donner la relation d'Einstein ;
- écrire la relation entre le joule, l'unité de masse atomique et l'électronvolt.

I. Composition du noyau :

1. Les nucléons : Le mot nucléon désigne les particules contenues dans le noyau : le proton et le neutron.

a. Le proton : le proton a une masse de $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Il porte une charge électrique élémentaire positive. Il est stable (son temps de vie est pratiquement infini).

b. Le neutron : Il a une masse légèrement supérieure. Il est électriquement neutre. Lorsqu'il est libre il n'est pas stable. En revanche lorsqu'il est lié dans le noyau, il est généralement stable.

2. Les nucléides :

a. Définition : L'ensemble des atomes dont les noyaux ont même nombre de protons Z et de nucléons A est appelée nucléide.

b. Symbole :

Un nucléide particulier d'élément X , est représenté par le symbole : ${}^A_ZX$.

A est le nombre de masse (ou nombre de nucléons) et Z est le numéro atomique de l'élément (ou nombre de protons).

3. Les isotopes :

a. Définition : On appelle isotopes d'un élément les nucléides ayant même nombre de protons Z , mais des nombres de nucléons différents A .

b. Exemples : ${}^{12}_6C$, ${}^{13}_6C$, ${}^{14}_6C$

II. Dimension du noyau :

1. Le rayon :

- Le rayon R_0 d'un proton est égale à celui du neutron. Le volume d'un nucléon est alors $V_0 = \frac{4}{3} \pi R_0^3$.

- Si R est le rayon du noyau, son volume V est égal à : $V = \frac{4}{3} \pi R^3$

Par ailleurs $V = A \cdot V_0$. Donc : $\frac{4}{3} \pi R^3 = A \cdot \frac{4}{3} \pi R_0^3$

Ce qui conduit à $R = R_0 \cdot A^{\frac{1}{3}}$ ou $R = R_0 \cdot \sqrt[3]{A}$.

NB : cette loi est approchée, car bien qu'ils soient jointifs, il existe entre les nucléons sphériques des intersections vides. En pratique $R_0 = 1,2 \text{ fm}$ (femtomètre). $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$.

2. **La masse du noyau** : La masse d'un noyau ${}^A_Z X$ est toujours inférieure à la somme des masses de ses nucléons constitutants. $M < (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n)$. m_p est la masse du proton et m_n la masse du neutron.

III. Stabilité du noyau :

Un Noyau stable est un noyau qui a une durée de vie illimitée. Ex: ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$

Les noyaux instables tendent à se transformer spontanément en un noyau plus stable par émission de rayonnement. Ex : cobalt 60, plutonium 239.

Un nucléide stable est un nucléide dont la composition du noyau ne se modifie jamais.

La stabilité est obtenue pour les éléments légers, si le nombre de protons est égal au nombre de neutrons, et pour les éléments lourds, si il y a un excès de neutrons d'autant plus grand que l'élément est lourd.

Un nucléide instable est un nucléide dont la composition du noyau peut se modifier : l'instabilité est due à un excès relatif de neutrons.

IV. Énergie de liaison :

1. Unité de masse atomique :

- a. **Définition** : L'unité de masse atomique est le $\frac{1}{12}$ ème de la masse de l'isotope 12 du carbone ${}^{12}_6\text{C}$.

Son symbole est u. Son unité SI est le kilogramme (kg) et 'unité utilisée pour les particules est (MeV/c² méga électronvolt par c²).

- b. **Relation** : la correspondance entre les trois unités de masse est :

$$1\text{u} = 1,661 \times 10^{-27}\text{kg} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

2. **Énergie de liaison** : L'énergie de liaison d'un noyau est l'énergie qu'il faut communiquer au noyau initialement au repos, pour le dissocier en nucléons isolés, également au repos.

Elle donnée par la relation d'Einstein: $E_L = \Delta m \cdot c^2$.

Où Δm est le défaut de masse ; c- la célérité de la lumière dans le vide.

Défaut de masse : la différence entre la masse des nucléons et la masse M du noyau est appelée défaut de masse noté Δm . $\Delta m = (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n) - M$.

Lors de la formation du noyau, l'énergie E_L est libérée.

VI Réactions nucléaires

Classe 12^{ème} SE,SB

Discipline : Physique

Objectifs : L'élève doit être capable de :

- définir la radioactivité ;
- définir une substance radioactive ;
- décrire une expérience de mise en évidence des rayonnements radioactifs ;
- définir les radioactivités α , β^+ , β^- et γ ;
- écrire l'équation bilan d'une réaction radioactive ;
- énoncer la loi de désintégration radioactive ;
- définir une famille radioactive, une période radioactive ;
- énoncer les lois de conservations ;
- définir une transmutation, une fusion, une fission nucléaires ;
- écrire les équations bilan d'une transmutation, d'une fusion, d'une fission nucléaires ;
- définir un nucléide fissible, fertile ;
- citer des exemples de nucléides fissible, fertile ;
- citer des applications de la radioactivité.

I. Réaction nucléaire spontanées :

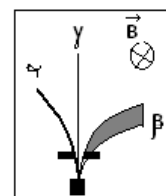
1. Définition :

- a. La radioactivité** : est la propriété spécifique de certains nucléides instables de se transformer spontanément en émettant une particule.
- b. Une substance radioactive** : est une substance contenant des atomes radioactifs instables qui émettent du rayonnement ionisant lorsqu'ils se désintègrent.

La **transmutation** est la transformation d'un élément chimique en un autre par une modification du noyau atomique de l'élément. Elle est aussi appelée transmutation nucléaire.

2. Émission radioactive et détection :

Les particules émises par une source radioactive ont des trajectoires différentes lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ magnétique orthogonal à leur direction de propagation. Rutherford par cette expérience montra qu'un échantillon radioactif naturel émet des particules α , β et γ .

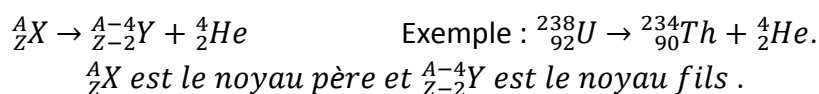


3. Lois de conservations :

Toutes les réactions nucléaires vérifient les lois de conservation :

- de la charge électrique ;
- du nombre de nucléons ;
- de la quantité de mouvement ;
- de l'énergie totale.

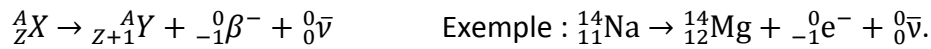
- 4. La radioactivité α** : est la transformation spontanée d'un noyau en un autre noyau accompagnée de l'émission d'un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$.



- 5. La radioactivité β^+** consiste en la transformation spontanée d'un noyau accompagné de l'émission d'un positron.



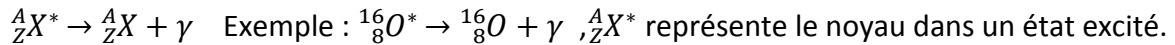
6. La radioactivité β^- consiste en la transformation spontanée d'un noyau accompagné de l'émission d'un électron.



NB : un neutrino est une particule de nulle se déplaçant à la vitesse de la lumière.

L'antineutrino est l'antimatière du neutrino. Le positron est l'antimatière de l'électron.

7. **Le rayonnement γ** : consiste en l'émission d'un photon par un noyau lors du retour d'un état excité à l'état stable.



8. La décroissance radioactive. Famille radioactive.

- a. **L'activité** : de la source est le nombre de désintégration par unité de temps. Son unité est le Becquerel (Bq). Elle est notée :

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

- b. **La décroissance radioactive** :

Si $N(t)$ est le nombre de noyaux de la source non désintégrés à la date t , le nombre moyen $(-dN)$ de noyaux qui se désintègrent durant l'intervalle de temps dt est proportionnel à dt (le signe $(-)$ signifie qu'il s'agit d'une diminution du nombre de noyaux de la source). D'où $-dN = \lambda N dt$, λ est la constante radioactive du nucléide.

D'où $-\frac{dN}{dt} = \lambda N \Rightarrow -\frac{dN}{N} = \lambda dt$. En intégrant, on obtient :

$$-\ln N = \lambda t + Cte$$

À $t=0$, $N=N_0$ $-\ln N_0 = 0 + Cte \Rightarrow Cte = -\ln N_0 \Rightarrow -\ln N = \lambda t - \ln N_0$

$$\ln N_0 - \ln N = \lambda t \Rightarrow \ln \left(\frac{N_0}{N} \right) = \lambda t \Rightarrow \frac{N_0}{N} = e^{\lambda t} \Rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

Le nombre de noyau désintégré à la date t est : $N = N_0 e^{-\lambda t}$.

L'activité est : $A = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$, $A_0 = \lambda N_0$. Ainsi $A = A_0 e^{-\lambda t}$.

La loi de décroissance radioactive est donnée par les relations :

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ ou } A = A_0 e^{-\lambda t}.$$

- c. **La période radioactive ou demi-vie** : La période T ou demi vie est temps nécessaire pour que la moitié du nombre de noyaux initial soit désintégré.

$$\text{À date } t=T \quad N = \frac{N_0}{2} \Rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \Rightarrow -\ln 2 = -\lambda T \Rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

La période radioactive du nucléide est : $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

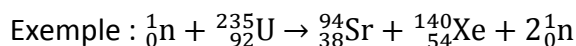
- d. **Famille radioactive** : Une famille radioactive est composé d'un ensemble de noyaux instables provenant tous du même noyau instable initial et qui par désintégration en cascade, conduisent à un noyau stable. Ex : Famille radioactive de l'uranium.

II. Réactions nucléaire provoquées.

Une réaction nucléaire est une réaction entre noyaux.

a. Réactions de fission nucléaire :

La fission nucléaire est la cassure d'un noyau lourd sous l'impact d'un neutron.



Un nucléide fissile est un nucléide susceptible d'être transformé en un nucléide fissile.

Exemple : le plutonium 239 obtenu à partir de l'uranium.

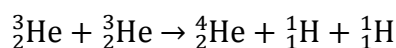
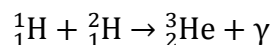
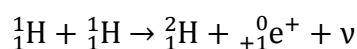
Les réactions nucléaires de fission, qui font intervenir des modifications du noyau de l'atome, sont maintenant bien maîtrisées et ont d'importantes applications industrielles.

b. Les réactions de fusion nucléaire :

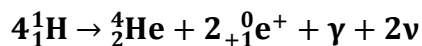
La fusion est la réaction de deux noyaux légers pour former un noyau lourd.

Exemple : la synthèse de l'hydrogène en hélium.

Elle se fait selon la réaction en chaîne :



Si nous multiplions les deux premières équations par deux et si nous additionnons le tout, nous obtenons le bilan :



${}_1^2\text{H}$ est le deuton, ${}_{+1}^0\text{e}^+$ est le positron antiparticule de l'électron, γ est un photon énergétique et ν est le neutrino.

Les réactions nucléaires de fusion de noyaux légers libèrent encore plus d'énergie que les réactions de fission de noyaux lourds. Elles ne sont pas encore au point sur le plan industriel. Elles sont la cause de l'énergie des étoiles.

III. Applications :

Les réactions nucléaires de fissions sont utilisées dans les réacteurs nucléaires pour produire de l'énergie électrique.

La radioactivité est utilisée en médecine dans la scintigraphie (étude du fonctionnement des organes), le traitement des tumeurs (radiothérapie), elle est utilisée pour la datation (par le carbone 14), elle également utilisée dans la conservation des denrées par irradiation gamma, la stérilisation, etc.

Deuxième partie

Chimie

Chapitre 1 Chimie organique

I Stéréochimie

Classe : 12^{ème} SB et SE

Discipline : Chimie

Objectif : L'élève doit être capable de :

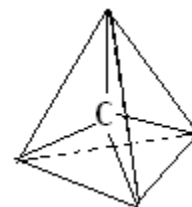
- représenter une molécule dans l'espace ;
- définir la stéréochimie ; identifier un carbone asymétrique ;
- identifier une isométrie de conformation, une isométrie de configuration ;
- définir une molécule chirale , des énantiomères ;
- expliquer l'activité optique ;
- définir un mélange racémique ;
- définir un diastéréoisomère.

I. Le carbone tétragonal :

La Stéréochimie est l'étude des molécules dans l'espace.

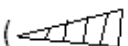
1. Définition

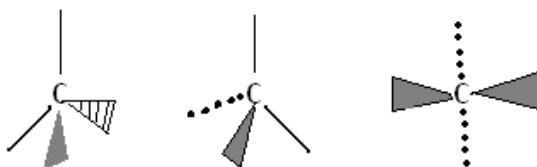
Un carbone tétragonal établit quatre liaisons de covalences simples avec quatre atomes distincts. Le carbone est dit aussi tétraédrique. L'atome de carbone est au centre d'un tétraèdre régulier.

**2. Représentation spatiale(ou perspective) : conventions de Cram.**

Pour représenter l'aspect tridimensionnel des molécules, les chimistes utilisent souvent un dessin en respectant certaines règles.

Convention de Cram :

- Un trait plein (—) représente une liaison dans le plan de la figure ;
- Un triangle plein () représente une liaison dirigée vers l'avant de la figure ;
- Un triangle hachuré () , un pointillé (.....) représente une liaison dirigée vers l'arrière du plan de la figure.

Représentation spatiale ou représentation perspective du carbone tétraédrique.

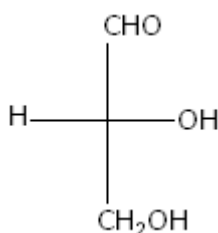
Remarque : On utilise également le modèle moléculaire et les objets virtuels.

Représentation de Fischer, conventions : la molécule doit être observée dans une position bien précise :

- le squelette carboné est vertical ;
- la fonction la plus oxydée (aldéhyde, cétone ou acide carboxylique) est orientée vers le haut ;
- les liaisons entre carbones s'éloignent de l'observateur (chaîne carbonée vers l'arrière) ;
- dans cette position, les fonctions formant l'alcool secondaire ou la fonction amine sont liés horizontalement au carbone asymétrique et sont dirigés vers l'observateur (vers l'avant).

La **Formule de Fischer (ou représentation de Fischer)** est la projection dans le plan de ce que voit l'observateur lorsque la molécule est placée dans la position correcte.

Ex : Le glycéraldéhyde : $\text{CH}_2\text{OH} - \text{CHOH} - \text{CHO}$



II. Types d'isomérisation :

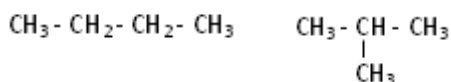
1. Isomérisation de constitution :

Deux corps sont isomères de constitution lorsqu'ils ont la même formule brute, mais des formules planes différentes.

On distingue :

- Les isomères de chaîne : ils ne diffèrent que par l'enchaînement des atomes de carbone.

Ex : C_4H_{10}



- Les isomères de position : ils ont la même chaîne carbonée, mais diffèrent par l'implantation le long de cette chaîne d'un même groupe fonctionnel.

Ex : $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{OH}$ et $\text{CH}_3 - \text{CHOH} - \text{CH}_3$

- Les isomères de fonction : ils ne diffèrent que par la nature du groupe fonctionnel présent dans leur molécule

Ex : $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CHO}$ et $\text{CH}_3 - \text{CO} - \text{CH}_3$

2. Stéréo-isomérisation

Deux corps sont stéréo-isomères lorsqu'ils ont la même formule plane, mais des structures spatiales différentes.

III. Stéréoisomérisation de conformation :

1. Définition :

On appelle conformation d'une molécule les différentes structures spatiales qu'elle peut prendre par suite de rotation autour de ses liaisons simples.

Deux molécules identiques dans des conformations différentes sont des stéréo-isomères de conformation.

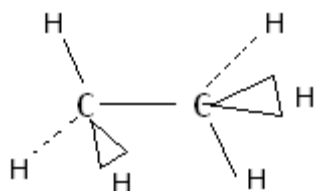
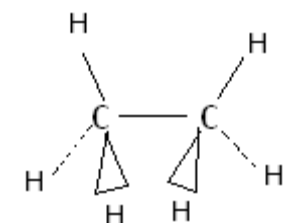
2. Cas de l'éthane ($\text{CH}_3\text{-CH}_3$) : Projection de Newman

Par suite de libre rotation autour de la liaison carbone-carbone, la molécule d'éthane présente à chaque instant une infinité de stéréo-isomères de conformation qu'il est impossible d'isoler les uns des autres.

Deux conformations sont remarquables : la conformation éclipsée et la conformation décalée ou étoilée.

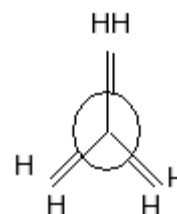
La projection du modèle perspective dans un plan en regardant suivant l'axe carbone-carbone est appelée projection de Newman.

Représentation perspective

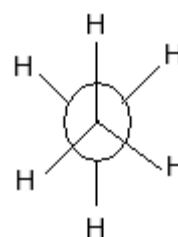


Projection de Newman

Conformation éclipsée



Conformation décalée
ou étoilée



3. Cas du cyclohexane C_6H_{12}

Dans le cas de l'éthane, la libre rotation C-C est totale, dans le cas du cyclohexane elle est partielle. La molécule oscille entre la conformation chaise et la conformation bateau.

Conformation chaise :



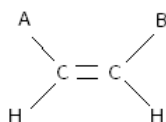
conformation bateau :



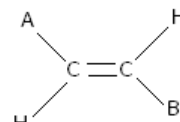
IV. Isomérisie de configuration Z/E :

Les composés éthyléniques du type AHC=CHB (A et différent de H) présentent tous l'isomérisie Z/E. Les atomes H peuvent être remplacés par des atomes ou groupes d'atomes différents de A et B.

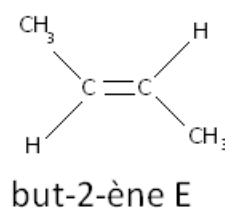
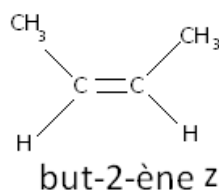
Configuration z



Configuration E



Exemple : $\text{CH}_3\text{-CH=CH-CH}_3$



Remarque:

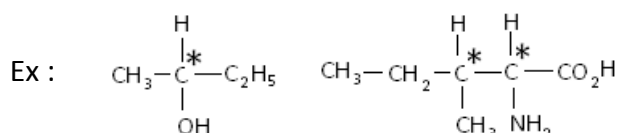
Alors que le passage d'un stéréo-isomère de conformation à un autre est possible sans rupture de liaison chimique, le passage d'un stéréoisomères de configuration à un autre nécessite toujours la rupture des liaisons chimiques.

On appelle configuration d'une molécule la forme rigide de cette molécule.

La double liaison C=C bloque la rotation. L'isomère Z et l'isomère E sont deux corps distincts que l'on peut isoler et dont les propriétés physiques, chimiques et biologiques peuvent être très différentes.

V. Enantiomérisation :**1. Carbone asymétrique :**

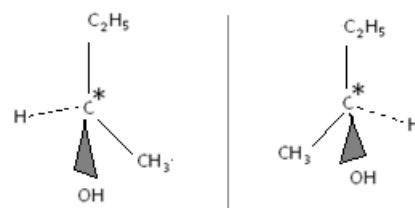
Un atome de carbone asymétrique est un atome de carbone tétraédrique lié à quatre atomes ou groupes d'atomes tous différents. On le repère par un astérisque (*)

**2. Enantiomères :**

Deux stéréoisomères de configuration, image l'un de l'autre dans un miroir et non superposables sont appelés énantiomères.

A toute formule plane comportant un atome de carbone asymétrique correspond un couple d'énantiomères.

Le butan-2-ol $\text{C}_2\text{H}_5-\text{C}^*\text{HOH}-\text{CH}_3$ peut exister sous deux configurations.

**3. Chiralité :**

La chiralité désigne la propriété d'un objet de ne pas être superposable à son image dans un miroir.

Une molécule chirale est une molécule qui n'est pas superposable à son image dans un miroir.

Une molécule comportant un atome de carbone asymétrique est toujours chirale.

Les molécules des énantiomères sont chirales.

4. Propriétés des énantiomères : activité optique

- Une lumière est dite polarisée rectilignement lorsque le vecteur lumineux reste parallèle à une direction donnée.
- Une substance transparente est traversée par la lumière polarisée rectilignement. La substance est dite optiquement inactive.

Ex : verre, eau solution de molécules achirales, etc.

- Si au fur et à mesure de la traversée les vecteurs lumineux tournent, la substance est dite optiquement active ou douée de pouvoir rotatoire.

Lorsque la rotation s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre pour un observateur qui reçoit la lumière, la substance est dite dextrogyre (pouvoir rotatoire+) , dans le cas contraire, elle est lévogyre (pouvoir rotatoire-) .

- **Mélange racémique** : un mélange racémique est un mélange contenant d'égales quantités de matières d'énantiomères dextrogyre et lévogyre aux pouvoirs rotatoires égaux et opposés (pouvoir rotatoire $\pm$).

NB : Un mélange racémique est optiquement inactif.

VI. Diastéréoisomerie:

Parmi les stéréoisomères de configuration, on distingue les énantiomères et les diastéréoisomères.

Deux diastéréoisomères sont deux stéréoisomères non énantiomères.

L'isomérisation Z/E est un exemple de diastéréoisomerie.

II LES ALCOOLS ET POLYALCOOLS

Classe : SE et SB

Discipline : Chimie

Objectifs :

- Donner la définition d'un alcool ;
- Ecrire la structure d'un alcool ;
- Donner les formules des 3 classes d'alcool ;
- Nommer un alcool ;
- Ecrire et interpréter les réactions d'oxydation des alcools ;
- Définir un polyalcool et donner des exemples.

I. Présentation des alcools**1. Définition, formule générale et structure.**

Un alcool est un composé organique possédant dans sa structure le groupe hydroxyle $-OH$ lié à un atome de carbone tétraédrique.

La formule générale d'un alcool saturé est : $R - OH$ ou $C_nH_{2n+1} - OH$

Le carbone qui porte le groupe hydroxyle est appelé **carbone fonctionnel**.

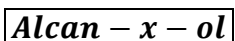
Les classes d'alcools

On distingue la classe des :

- **Alcools primaires** : Un alcool est dit primaire, si le carbone fonctionnel est lié à zéro ou un seul atome de carbone
 ➤ Formule générale : $R-CH_2-OH$ Exemples : CH_3-CH_2-OH
- **Alcools secondaires** : Un alcool est dit secondaire, si le carbone fonctionnel est lié à deux atomes de carbone
 ➤ Formule générale $R_1-CHOH-R_2$ Exemple : $CH_3-CHOH-CH_3$
- **Alcools tertiaires** : Un alcool est dit tertiaire, si le carbone fonctionnel est lié à trois atomes de carbone.
 ➤ Formule générale : $R_1-\underset{\substack{| \\ R_3}}{C}OH-R_2$ Exemple $CH_3-\underset{\substack{| \\ CH_3}}{C}OH-C_2H_5$

2. Nomenclature :

Le nom d'un alcool s'obtient en remplaçant le « e » de l'alcane correspondant par « ol » précédé d'un indice indiquant le numéro de l'atome de carbone portant le groupe fonctionnel $-OH$.



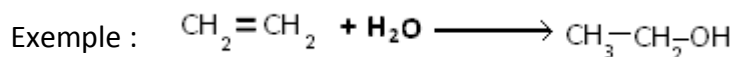
Exemples: CH_3-OH : méthanol; $CH_3-CHOH-CH_3$: propan-1-ol; $CH_3-CH_2-CH_2-CH_2OH$: butan-1-ol.

3. Préparation des alcools

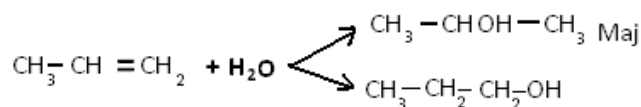
a. Par hydratation des alcènes en présence d'un catalyseur on obtient un alcool.



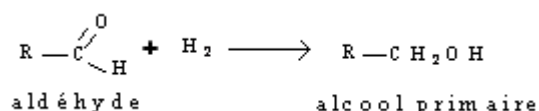
Si l'alcène est symétrique, on obtient un seul alcool.



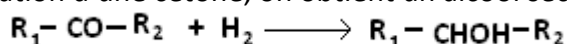
Dans le cas d'un alcène non symétrique on obtient deux alcools, l'un des alcools est obtenu majoritairement. C'est l'alcool de classe supérieure.



b. Par hydrogénation d'un aldéhyde, on obtient un alcool primaire



c. Par hydrogénation d'une cétone, on obtient un alcool secondaire



d. Par hydrolyse d'un ester



II. Oxydation des alcools

1. Oxydation complète

Elle s'accompagne d'une destruction du squelette carboné quelque soit l'alcool.

Selon l'équation : $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH} + 3n/2 \text{O}_2 \longrightarrow n\text{CO}_2 + (n+1) \text{H}_2\text{O}$

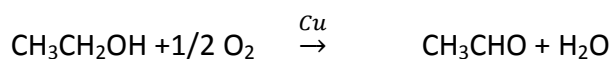
2. Oxydation ménagée des alcools

Une oxydation ménagée est une oxydation qui conserve la chaîne carbonée du composé oxydé.

a. Oxydation catalytique avec le dioxygène de l'air : expérience de la lampe sans flamme

Un mélange de dioxygène et de vapeurs d'éthanol en présence de **cuivre** ou de platine porté au rouge, réagit suivant une réaction exothermique.

Il se forme de l'éthanal et de l'acide éthanoïque suivants les oxydations ménagées successives :



b. Oxydation ménagée avec les solutions oxydantes

Les oxydants les plus utilisés sont : le dichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) et le permanganate de potassium (KMnO_4).

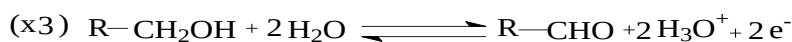
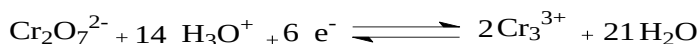
Les couples oxydants/réducteurs de ces ions sont : $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}/\text{Cr}^{3+}$ et $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$

Jaune Vert Violet incolore

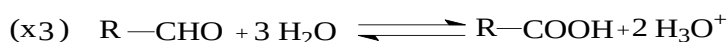
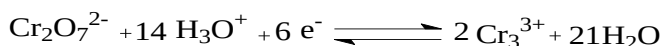
- L'oxydation ménagée d'un alcool primaire conduit à un aldéhyde si l'oxydant est en défaut. Alcool primaire $\rightarrow$ aldéhyde
- Lorsque l'oxydant est en excès l'aldéhyde se transforme à son tour en acide carboxylique
- L'oxydation ménagée d'un alcool secondaire conduit à une cétone que l'oxydant soit en défaut ou en excès
- L'oxydation ménagée d'un alcool tertiaire est impossible

Demi-équations électroniques et équilibrage des réactions d'oxydation des alcools

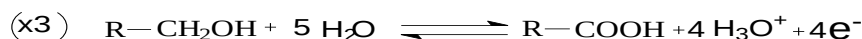
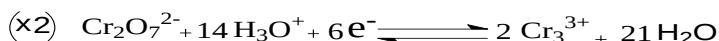
- Oxydation ménagée de l'alcool primaire en aldéhyde par l'ion dichromate



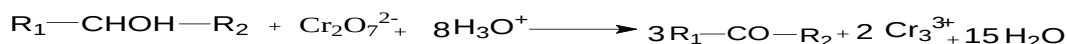
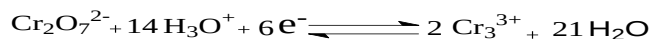
- Oxydation ménagée de l'aldéhyde en acide carboxylique



- Oxydation ménagée de l'alcool primaire en acide carboxylique



- Oxydation ménagée de l'alcool secondaire en cétone



3. Tests caractéristiques des produits d'une oxydation ménagée

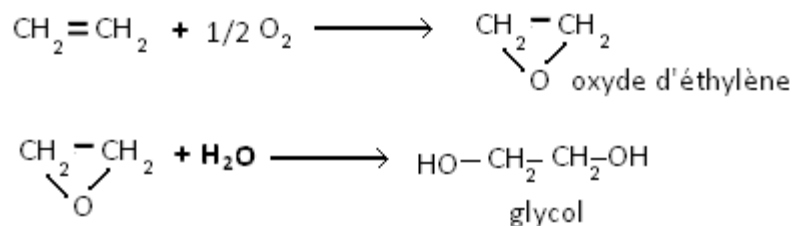
Test commun aux aldéhydes et cétones

Réactifs	Aldéhyde	Cétone	Acide carboxylique
2,4 D.N.P.H	Précipité Jaune	Précipité jaune	Rien
Réactif de Schiff	Couleur rose	Rien	Rien
Liquueur de Fehling	Couleur rouge brique	Rien	Rien
Nitrate d'argent ammoniacal R.T	Argent miroitant (blanc)	Rien	Rien

III. Les polyalcools

- Définition** Les polyalcools ou polyols sont des composés organiques constitués de molécules possédant 2 ou plusieurs groupes hydroxyle (s) -OH porté (s) par des carbones différents
- Exemples de polyalcools**
 - L'éthane-1,2-diol** : C'est le plus simple des dialcools. C'est un liquide sirupeux. Sa formule est : $\text{CH}_2\text{OH} - \text{CH}_2\text{OH}$

On le prépare à partir de l'oxyde d'éthylène, lui-même obtenu à partir de l'éthylène suivant les réactions



L'éthane-1,2-diol ou glycol est utilisé essentiellement comme antigel. Il est également utilisé pour la fabriquer le nitroglycol qui est un explosif, il est aussi utiliser les macromolécules de polyesters.

b. Le propane-1, 2,3-triol ou glycérol

C'est un liquide dense, soluble dans l'eau. Sa formule est $\text{CH}_2\text{OH} - \text{CHOH} - \text{CH}_2\text{OH}$

On le prépare à partir du propène.

On le prépare aussi par saponification de triester provenant de corps gras non comestible, on obtient en même temps des savons ?

Le glycérol ou glycérine est un liquide visqueux utilisé surtout en pharmacie. On l'utilise pour fabriquer la nitroglycérine qui est un explosif appelé « la dynamite ».

Il est aussi utiliser pour fabriquer des macromolécules de polyesters.

III LES AMINES

Classe : 12eme SB et SE

Discipline : Chimie

Objectifs : L'élève doit être capable de :

- donner la définition et la formule générale des amines ;
- écrire la structure d'une amine ;
- nommer une amine ;
- donner les caractères basiques et nucléophiles des amines ;
- donner les méthodes de préparation des amines

I. Définition et formule générale

Les amines sont des composés organiques dont la formule dérive formellement de celle de l'ammoniac par remplacement d'un, deux ou trois atomes d'hydrogène par un, deux ou trois groupes hydrocarbonés.

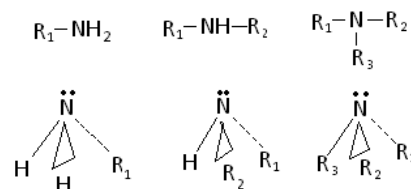
- L'amine est une alkylamine ou amine aliphatique lorsque tous les groupes hydrocarbonés sont des groupes alkyles : les amines aliphatiques ont pour formule brute $C_nH_{2n+1}NH_2$ ou $C_nH_{2n+3}N$
Exemples : $CH_3-CH_2-NH_2$; $CH_3-CH_2-NH-CH_3$; $(CH_3)_3N$
- L'amine est une arylamine ou amine aromatique si l'un au moins des groupes hydrocarbonés est un groupe aryle (un groupe aryle est un groupe dérivé du benzène ou d'un hydrocarbure aromatique).

Exemple: $CH_3-CH-CH_2-NH_2$



II. Structure :

Les amines ont une géométrie comparable à celle de l'ammoniac : l'atome d'azote occupe le sommet d'une pyramide : les molécules sont pyramidales.



L'atome d'azote des amines possède, comme dans la molécule d'ammoniac, un doublet libre d'électrons. Ce doublet confère aux amines des propriétés particulières :

- Propriétés basiques ;
- Propriétés nucléophiles

III. Les trois classes d'amines

Il existe trois classes d'amines.

1. **Amine primaire** : Une amine est dite primaire lorsque l'atome d'azote est lié à un seul groupe hydrocarboné

Formule générale : $R-NH_2$ **Exemples:** $CH_3-CH_2-NH_2$; $CH_3-CH_2-CH_2-NH_2$

2. Amine secondaire

Une amine est dite Secondaire, lorsque l'atome d'azote est lié à deux groupes hydrocarbonés

Formule générale : $R-NH-R'$ **Exemples :** $CH_3-CH_2-NH-CH_2-CH_3$; $CH_3-CH_2-CH_2-NH-CH_2-CH_3$

3. Amine tertiaire

Une amine est dite tertiaire, lorsque l'atome d'azote est lié à trois groupes hydrocarbonés

Formule générale : $\begin{array}{c} \text{R}-\text{N}-\text{R}' \\ | \\ \text{R}'' \end{array}$ Exemples : $\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{N}-\text{CH}_3 \\ | \\ \text{CH}_3 \end{array}$; $\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{N}-\text{CH}_3 \\ | \\ \text{CH}_3 \end{array}$

iv. Nomenclature

Il existe plusieurs nomenclatures des amines.

1. Amines primaires : $\text{R}-\text{NH}_2$

1^{ère} méthode : on ajoute la terminaison amine au nom du groupe alkyle R-

Exemples : $\text{C}_2\text{H}_5-\text{NH}_2$: **éthylamine** ; $\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_3 \\ | \\ \text{NH}_2 \end{array}$: **isopropylamine**

2^{ème} Méthode:

on nomme l'amine à partir du nom de l'alcane correspondant (avec élision du e) que l'on fait suivre de la terminaison **amine** en précisant la position du groupe $-\text{NH}_2$ par un indice de position.

Exemples : $\text{C}_2\text{H}_5-\text{NH}_2$: **éthan-1-amine** ou **éthanamine** ; $\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_3 \\ | \\ \text{NH}_2 \end{array}$: **Propan-2-amine**

Les diamines et les triamines primaires sont nommées en utilisant le nom de l'alcane correspondant (en conservant le e) suivi des suffixes diamine ou triamines (avec les indices de position des groupes $-\text{NH}_2$)

Exemples $\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2$: butane-1, 4- diamine; $\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\begin{array}{c} \text{CH}-\text{CH}_2-\text{NH}_2 \\ | \\ \text{NH}_2 \end{array}$: butane-1, 2, 4- triamine

3^{ème} Méthode :

On nomme l'amine comme un dérivé de substitution de l'alcane par le groupe amino (avec indice de position de ce groupe)

Exemples : $\text{C}_2\text{H}_5-\text{NH}_2$: aminoéthane $\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_3 \\ | \\ \text{NH}_2 \end{array}$: 2-aminopropane.

2. Amines secondaires et tertiaires

a. On obtient le nom des amines secondaires et tertiaires symétriques : $\text{R}-\text{NH}-\text{R}$ et $\begin{array}{c} \text{R}-\text{N}-\text{R} \\ | \\ \text{R} \end{array}$

en faisant suivre le nom du groupe alkyle (précédé du préfixe di ou Tri) de la terminaison amine.

Exemples : $\text{CH}_3-\text{NH}-\text{CH}_3$: diméthylamine ; $\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{N}-\text{CH}_3 \\ | \\ \text{CH}_3 \end{array}$: triéthylamine.

b. Les amines secondaires et tertiaires non symétriques : $\text{R}-\text{NH}-\text{R}'$ et $\begin{array}{c} \text{R}-\text{N}-\text{R}' \\ | \\ \text{R}'' \end{array}$

Elles sont nommées comme des dérivées de substitution sur l'azote de l'amine.

R-NH₂ ou R- est le groupe le plus long. On écrit donc le(s) groupe(s) substituant(s) sur l'azote du groupe -NH₂ précédés de la lettre N et suivi(s) du nom de l'amine

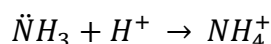
Exemples **CH₃-NH-CH₂-CH₃ : N-méthyléthylamine** ; $\text{CH}_3-\underset{\text{C}_2\text{H}_5}{\underset{|}{\text{N}}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$: **N-éthyl N-méthyl propylamine**.

V. Caractères basique et nucléophile des amines

1. Caractère basique :

Une base est un corps capable de capter un proton H^+ .

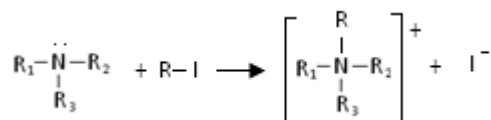
Le caractère basique des amines est dû à la présence sur l'atome d'azote d'un doublet d'électrons qui peut fixer un proton H^+ au cours d'une réaction chimique :



L'acide conjugué d'une amine B est un ion alkylammonium substitué BH^+ .

2. Caractère nucléophile des amines

Un composé nucléophile est un composé qui aime les « noyaux » c'est-à-dire les charges positives. Une amine tertiaire réagit avec un dérivé halogéné R-X pour donner des ions tetrasubstitués dit « ion quaternaires ». On utilise surtout des iodures R-I.



L'équation bilan s'écrit :

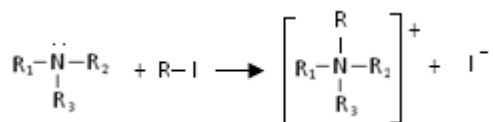
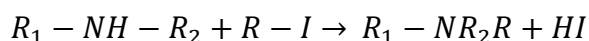
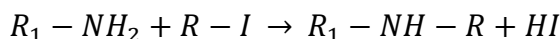
Dans cette réaction, l'iodure étant polarisée $\text{R}^{\delta+} - \text{I}^{\delta-}$, le doublet est capté par l'iode. Le doublet libre de l'azote de l'amine attaque le centre positif, on dit que l'amine est un réactif nucléophile.

VI. Préparation des amines :

On obtient une amine, en substituant 1,2 ou 3 atomes d'hydrogène de NH₃ par des radicaux alkyles. Ce remplacement peut être obtenu par action d'alcool sur l'ammoniac.

1. Méthode d'Hofmann :

Une amine primaire réagit avec un dérivé halogéné pour donner une amine secondaire, une amine secondaire conduit à une amine tertiaire et l'amine tertiaire conduit à un ion quaternaire.



Ces réactions sont appelées réactions d'alkylation ou réaction d'Hofmann. Dans toutes ces réactions les amines apparaissent comme des réactifs nucléophiles.

2. Méthode de Sabatier :

On fait réagir un alcool sur l'ammoniac vers 300° en présence de thorine

- | | |
|-----------------------|---|
| a. Amine primaire : | $\text{R}-\text{OH} + \text{NH}_3 \longrightarrow \text{R}-\text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O}$ |
| b. Amine secondaire : | $\text{R}-\text{NH}_2 + \text{R}'-\text{OH} \longrightarrow \text{R}-\text{NH}-\text{R}' + \text{H}_2\text{O}$ |
| c. Amine tertiaire : | $\text{R}-\text{NH}-\text{R}' + \text{R}''-\text{OH} \longrightarrow \underset{\text{R}''}{\underset{ }{\text{R}-\text{N}-\text{R}'}} + \text{H}_2\text{O}$ |

IV LES ACIDES CARBOXYLIQUES et LES FONCTIONS DERIVEES

Classe : 12eme SB et SE

Discipline : Chimie

Objectifs :

- Donner la définition et la formule générale d'un acide carboxylique ;
- Ecrire la structure du groupe carboxylique ;
- Nommer un acide carboxylique et les ions carboxylates ;
- Ecrire les fonctions dérivées et dire leurs propriétés essentielles.

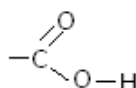
I. Les acides carboxyliques**1. Définition et formule générale**

Un acide carboxylique est un composé organique qui possède, dans sa structure le groupe carboxyle -COOH .

La formule générale des acides carboxyliques s'écrit

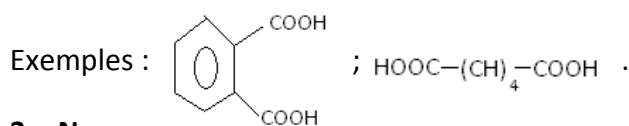
- R-COOH ; avec R radical alkyle pour les acides aliphatiques
- Ar-COOH ; avec Ar radicale phényle pour les acides aromatiques.

Remarque : si R est groupe alkyle ou un atome d'hydrogène, on peut écrire la formule brute de l'acide comme suit : $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{CO}_2$

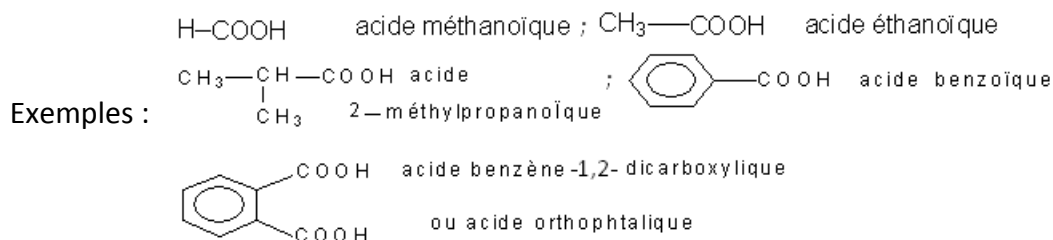
2. Structure du groupe carboxyle

Le carbone du groupe carboxyle s'appelle carbone fonctionnel.

Dans certains composés il y'a plusieurs groupes carboxyles : ce sont les polyacides.

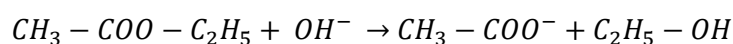
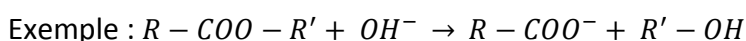
**3. Nomenclature**

Le nom de l'acide dérive de celui de l'alcane de même chaîne carbonée en remplaçant le « e » final par la terminaison « oïque ».

Alcanoïque.**4. Réaction de saponification**

- **Définition :** la saponification d'un ester est son hydrolyse en présence d'une base forte concentrée (soude ou potasse).

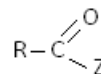
L'équation-bilan de la réaction s'écrit dans le cas général :



II. Fonctions dérivées :

On obtient une fonction dérivée d'acide carboxylique en remplaçant le groupe (-OH) de l'acide carboxylique par un groupe d'atomes noté Z.

La formule générale d'un dérivé d'acide carboxylique s'écrit :

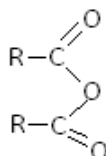


1. Anhydride d'acide

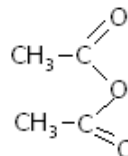
a. Formule générale et nomenclature

➤ Formule générale

Les anhydrides ont pour formule :



Exemple :



b. Nomenclature

- ✓ Le nom d'un anhydride s'obtient en remplaçant le mot acide par le mot **anhydride** dans le nom de l'acide correspondant.

Exemples : $\text{CH}_3-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{CH}_3$ anhydride éthanoïque.

Pour les anhydrides mixtes qui proviennent de deux acides différents, on fait suivre le mot anhydride des adjectifs correspondants aux deux acides dans l'ordre alphabétique et sépare par le mot et :

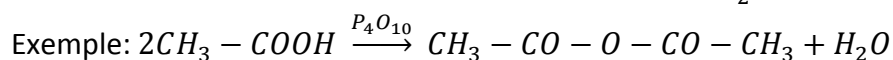
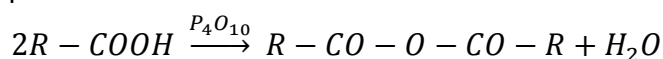
Exemples : $\text{CH}_3-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_3$ anhydride éthanoïque et 2-méthylpropanoïque.

c. Obtention :

Un anhydride est obtenu par déshydratation :

- intermoléculaire : anhydride résulte formellement de l'élimination d'une molécule d'eau entre deux molécules d'acides.

On utilise généralement un déshydratant énergétique comme le décaoxyde de tétraphosphore P_4O_{10} et à haute température.



- Intramoléculaire d'un diacide carboxylique dont les deux groupes COOH sont suffisamment proches.

2. Les chlorures d'acyles (ou d'acide)

a. Formule générale et nomenclature

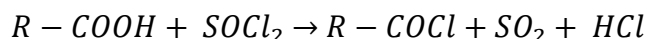
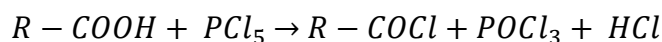
➤ **Formule générale** : La formule générale des chlorures d'acides s'écrit : $\text{R}-\text{COCl}$ ou $\text{R}-\text{C} \begin{array}{l} \text{O} \\ \text{O} \end{array} \text{Cl}$.

➤ **Nomenclature** : Le nom d'un chlorure d'acyle dérive du nom de l'acide carboxylique correspondant : le mot acide est remplacé par le mot **chlorure de** et la terminaison « oïque » par « oyle »

Exemples : CH_3-COCl : Chlorure d'éthanoyle ; $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{COCl}$: Chlorure de propanoyle.

b. Obtention

Pour préparer un chlorure d'acyle, on fait agir sur l'acide carboxylique un agent chlorurant comme le pentachlorure de phosphore (PCl_5) ou le chlorure de thionyle ($SOCl_2$).



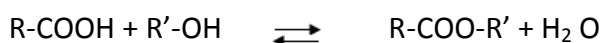
3. Les esters

a. Formule générale et nomenclature

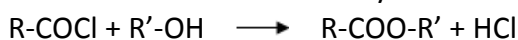
- **Formule générale** : La formule générale de l'ester est $R-COO-R'$
- **Nomenclature** : Le nom d'un ester comporte deux termes :
 - ✓ Le premier, avec la terminaison « oate », désigne la chaîne dite principale provenant de l'acide carboxylique ; cette chaîne si nécessaire est numérotée à partir de l'atome de carbone fonctionnel.
 - ✓ Le second, avec la terminaison « yle », est le nom du groupe alkyle provenant de l'alcool ; cette seconde chaîne carbonée est numérotée, si nécessaire, à partir de l'atome de carbone lié à l'oxygène.

a) **Obtention** : On peut préparer les esters de trois façons :

Action d'un alcool sur un acide carboxylique : estérification directe. Cette réaction est lente, limitée et athermique.



- Action d'un alcool sur un chlorure d'acide ou sur un anhydride : estérification indirecte.

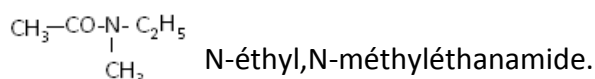


Les deux dernières réactions sont rapides, totales et exothermiques.

4. Les amides

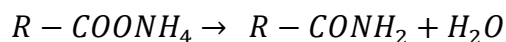
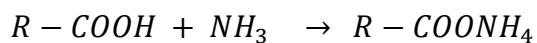
a. Formule générale et nomenclature

- **Formule générale** : La formule générale de l'amide est $R-CONH_2$.
- **Nomenclature**
 - ✓ Le nom d'une amide non substituée est obtenu à partir du nom de l'acide correspondant en supprimant le mot acide et en remplaçant la terminaison « oïque » par « amide » **Exemple** : $CH_3-CH_2-CONH_2$: propanamide
 - ✓ Lorsque l'atome d'azote est lié à des groupes alkyles ou aryles, le nom de l'amide est précédé de la mention N-alkyl ou N-aryle.
Les formules générales sont : $R-CONH-R'$ et $R-CONR'R''$
Exemples : $CH_3-CH_2-CO-NH-CH_3$: N-méthylpropanamide ;



b. Obtention

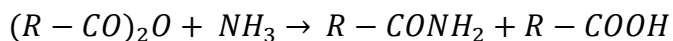
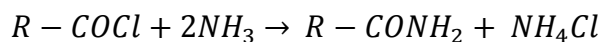
- **A partir des acides carboxyliques : la réaction se fait en deux étapes** :
On obtient d'abord un carboxylate d'ammonium (solide) qui se déshydrate à son tour pour donner un amide non substitué.



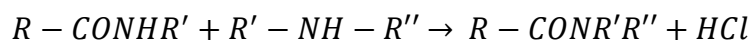
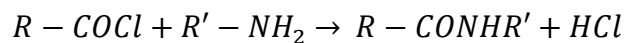
Pour les amides N-substitués : faire réagir un acide carboxylique avec une amine primaire ou secondaire. Le rendement de ces réactions est faible.

- **A partir des dérivés d'acides carboxyliques**

On obtient un amide non substitué à l'azote par action de l'ammoniac sur un chlorure d'acyle ou sur un anhydride d'acide.



On obtient les amides substitués à l'azote en remplaçant dans les réactions précédentes l'ammoniac par une amine primaire ou secondaire.



V Les acides α aminés.

Classe : 12^{ème} SE et SB

Discipline : Chimie

Objectif : L'élève doit être capable de :

- donner la définition et la formule générale des acides α -aminés ;
- écrire la structure des acides α -aminés ;
- nommer un acide α -aminé ;
- donner les propriétés des acides α -aminés en solution aqueuse ;
- définir et identifier une liaison peptidique ;
- donner la différence entre un peptide et une protéine.

I. Définition et formule générale :

- ❖ Un acide aminé ou amino acide contient un groupe carboxyle $-\text{COOH}$ et un groupe amino $-\text{NH}_2$.
- ❖ Dans un acide α -aminé les groupes amino et carboxyle sont liés à un même atome de carbone.

La formule générale des acides α -aminés s'écrit : $\begin{array}{c} \text{R}-\text{CH}-\text{COOH} \\ | \\ \text{NH}_2 \end{array}$ où R est appelé groupe résiduel par les biologistes.

II. Structure et chiralité des molécules :

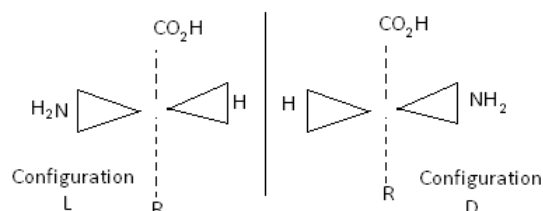
Les acides α -aminés du type $\begin{array}{c} \text{R}-\text{CH}-\text{COOH} \\ | \\ \text{NH}_2 \end{array}$ avec R différent de H, possèdent au moins un atome de

carbone asymétrique : le carbone N°2 portant le groupe amino.

En supposant que le groupe résiduel R ne comporte pas de carbone asymétrique, un acide α -aminé existe sous la forme de deux énantiomères aux activités optiques opposées.

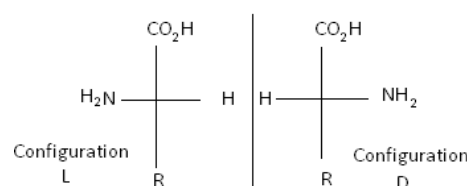
Conventions : On place $-\text{CO}_2\text{H}$ vers le haut et à l'arrière et $-\text{R}$ vers le bas et à l'arrière. (La chaîne carbonée se trouve ainsi dans un plan vertical).

- Si $-\text{NH}_2$ est vers l'avant gauche, l'énantiomère est L acide α -aminé ;
- Si $-\text{NH}_2$ est vers l'avant droit, l'énantiomère est le D acide α -aminé.



Représentation de Fisher : en projetant le modèle perspective dans le plan de la figure horizontale qui respecte les conventions citées précédemment, on obtient la représentation de Fischer.

Remarque : Un acide de configuration L peut être dextrogyre (Ex : L alanine) ou lévogyre (L leucine).



III. Nomenclature :

Lorsque R est un groupe alkyl, pour obtenir le nom d'un acide aminé, on part du nom de l'acide et on précise la position du groupe amino. Pour les acides α -aminés, le groupe amino est sur le carbone N°2.

Exemples : Acide 2-amino 3-méthylbutanoïque : $\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}-\text{COOH} \\ | \quad | \\ \text{CH}_3 \quad \text{NH}_2 \end{array}$

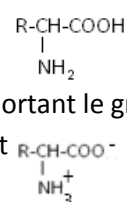
Acide 3-aminopentanoïque : $\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{COOH} \\ | \\ \text{NH}_2 \end{array}$

IV. Propriétés acido-basiques :

Chimie 1 contre pas en solution aqueuse l'espèce moléculaire :

■ On rencontre les trois espèces :

- l'amphion ou zwitterion : espèce bipolaire, électriquement neutre portant le groupe acide NH_3^+ et le groupe base $-\text{COO}^-$. L'amphion est noté Z, sa formule générale est



- le cation noté A, qui est espèce double acide portant les groupes acides $-\text{COOH}$ et NH_3^+ .

Sa formule s'écrit :

$$\begin{array}{c} \text{R}-\text{CH}-\text{COOH} \\ | \\ \text{NH}_3^+ \end{array}$$

- L'anion noté B qui est une espèce double base portant les groupes bases $-\text{COO}^-$ et NH_2 .

Sa formule s'écrit :

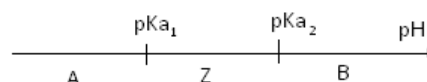
$$\begin{array}{c} \text{R}-\text{CH}-\text{COO}^- \\ | \\ \text{NH}_2 \end{array}$$

L'acide aminé est représenté par les partenaires des deux couples acide/base : A/Z et Z/B dont les pK_a sont respectivement pK_{a1} et pK_{a2} avec $pK_{a2} > pK_{a1}$.

Pour le couple A/Z : $\text{A} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Z} + \text{H}_3\text{O}^+$

Pour le couple Z/B : $\text{B} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Z} + \text{HO}^-$.

Le domaine de prédominance des trois espèces sur l'échelle des pH est :

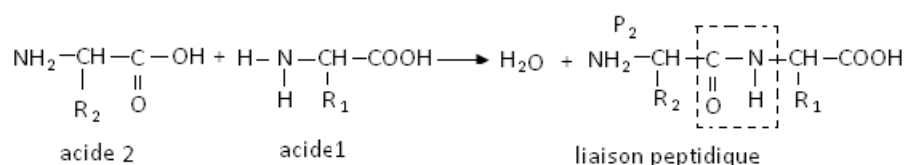
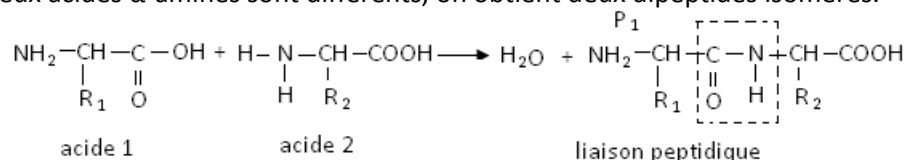


V. Liaison peptidique :

1. Formation de dipeptide :

Une liaison peut s'établir entre deux molécules d'acide α -aminé. On obtient un dipeptide.

Si les molécules des deux acides α -aminés sont différents, on obtient deux dipeptides isomères.



La réaction de formation des dipeptides est une réaction de condensation.

La liaison par un groupe amide qui s'établit entre les acides aminés est appelée liaison peptidique.

Pour obtenir le dipeptide P_1 de façon préférentielle, on empêche la formation de P_2 :

- On bloque la fonction acide de l'acide 2 et la fonction amine de l'acide 1.
- On active la fonction acide de l'acide 1 et on laisse libre la fonction amine de l'acide 2.

Pour bloquer une fonction acide on la transforme en ester.

Pour bloquer une fonction amide, on la transforme en amide.

Pour activer une fonction acide, on la transforme en chlorure d'acyle.

2. Passage aux protéines :

Le dipeptide à son tour peut se condenser avec un autre acide α -aminé pour donner un tripeptide, ainsi de suite....

On obtient les polyamides naturels que l'on divise :

- en peptide, si le nombre d'acide α -aminé dans la chaîne protéique est inférieur à 60.
- en protéines, si la chaîne protéique est plus importante.

Remarque : les acides α -aminés rencontrés chez les être vivants sont de configuration L.

Les protéines naturelles sont formées à partir d'une vingtaine d'acide α -aminés différents, ce sont les acides α -aminés essentiels.

VI Les polymères synthétiques

Classe 12^{ème} SE

Discipline : Chimie

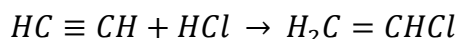
Objectif : L'élève doit être capable de :

- le mode de synthèse du chlorure de vinyle ;
- écrire les équations bilans des réactions de polymérisation ;
- donner les modes de synthèse des polymères : polyéthylène, P.V.C., polystyrène, nylon6, 6.

I. Obtention du chlorure de vinyle :

a. A partir de l'acétylène :

L'addition du chlorure d'hydrogène sur l'acétylène conduit au chlorure de vinyle. Le bilan de la réaction s'écrit :

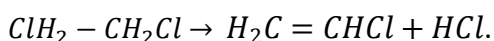


b. A partir de l'éthylène :

On prépare d'abord le 1,2-dichloroéthane :

- par action du dichlore sur l'éthylène : $H_2C = CH_2 + Cl_2 \rightarrow ClH_2 - CH_2Cl$
- ou par oxychloration : $H_2C = CH_2 + HCl + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow ClH_2 - CH_2Cl + H_2O$

Par craquage du 1,2-dichloroéthane on obtient le chlorure de vinyle :



II. Généralités :

- On appelle macromolécules, des molécules « géantes » composées d'un grand nombre d'atomes.
- On appelle polymérisation toute réaction chimique permettant d'enchaîner bout à bout un grand nombre de groupe identiques, afin d'obtenir une macromolécule appelée polymère.

La formule générale d'un polymère s'écrit : $-[G]_n-$.

G est le motif du polymère et n est l'indice (ou degré) de polymérisation.

- On appelle polyaddition, une polymérisation conduisant à l'addition les une aux autres de molécules appelées monomères.

Si M_p est la masse molaire du polymère et $M_m = M(G)$ la masse molaire du monomère, dans une polyaddition : $M_p = n \cdot M_m$

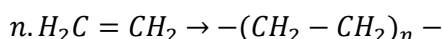
- On appelle condensation une réaction dans laquelle une petite molécule (H_2O , HCl , $CH_3 - OH$...) est éliminée.
- La polycondensation est une suite de réaction de condensation de molécules bifonctionnelles entre elles.

III. Réactions de polymérisation :

1. Le polyéthylène PE :

a. Synthèse :

On obtient le polyéthylène par polyaddition de l'éthylène. La réaction s'écrit :



b. Propriétés et applications :

Comme la plupart des polyéthylènes obtenus par polyaddition, le polyéthylène est thermoplastique, il se ramollit lorsqu'on le chauffe. Facile à mouler, ses propriétés mécaniques et électriques sont remarquables. Il est utilisé comme emballage, dans la fabrication de récipients, de tuyaux et d'isolant électriques.

2. Le polychlorure de vinyle PVC :**a. Synthèse :**

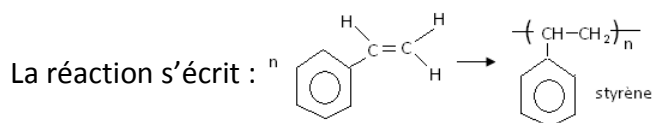
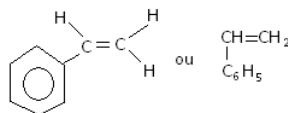
La polyaddition du chlorure de vinyle conduit au polychlorure de vinyle PVC. La réaction de polymérisation s'écrit : $n. H_2C = CHCl \rightarrow -(CH_2 - CHCl)_n -$

b. Propriétés et applications :

Le PVC est également thermoplastique, mais sensible à la chaleur. Ses propriétés mécaniques le font utiliser, pur ou modifié, dans une très grande variété de domaines : article de bureau ou ménagers, vêtements, sanitaires, jouets, etc.

3. Le polystyrène PS :**a. Synthèse :**

Le polystyrène est obtenu par polyaddition du styrène dont la formule est :

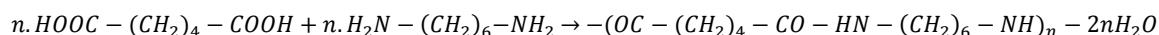
**b. Propriétés et applications :**

Le polystyrène est également thermoplastique, il est facile à mouler. C'est également un très bon isolant électrique. De nombreux emballages destinés à éviter les chocs sont constitués de polystyrène.

4. Le nylon 6,6 :**a. Synthèse :**

Le nylon 6,6 est une polyamide résultant de la polycondensation de l'acide hexanedioïque $HOOC - (CH_2)_4 - COOH$ et l'hexane-1,6-diamine $H_2N - (CH_2)_6 - NH_2$.

L'équation bilan peut s'écrire :

**b. Propriétés et applications :**

De part leur propriétés mécaniques et électriques, les nylons sont largement utilisés pour fabriquer toute sorte d'objets, dans des domaines aussi divers que l'automobile, l'électroménager, l'électricité, le bâtiment, le téléphone, les instruments médicaux. Ils sont de moins en moins utilisés comme textile synthétique.

VII Le glucose

Classe 12^{ème} SB

Discipline : chimie

Objectifs :

- donner la structure de la molécule du glucose ;
- donner les propriétés chimiques du glucose ;
- donner les méthodes de préparation du glucose ;
- définir les glucides et donner leur importance.

I. Structure de la molécule :

Le glucose est un ose simple et plus particulièrement un aldohexose. C'est un isomère d'autres sucres, en particulier le fructose, de formule brute : $C_6H_{12}O_6$.

La formule semi-développée du glucose s'écrit :



Le glucose possède 4 atomes de carbone asymétrique qui lui confèrent un pouvoir rotatoire. Le stéréoisomère naturel du glucose est le D-glucose.

II. Propriétés chimiques du glucose :

1. Propriétés de la fonction alcool :

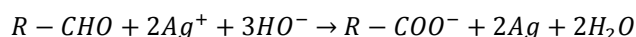
La fonction alcool primaire est portée par le carbone N°6, son oxydation donne de l'acide glucuronique si la fonction aldéhyde a été protégée.

L'acide nitrique à chaud oxyde les deux fonctions terminales du glucose et forme un diacide : l'acide glucarique.

2. Propriétés de la fonction aldéhyde :

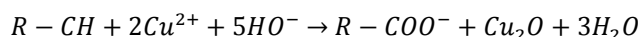
Le glucose est un glucide réducteur, il est capable de réduire :

- le réactif de Tollens : l'ion argent oxyde la fonction aldéhyde selon l'équation bilan :



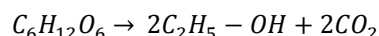
Un dépôt d'argent se forme sur les parois évoquant un miroir.

- la liqueur de Fehling : l'ion Cu^{2+} oxyde l'aldéhyde, il se forme un précipité rouge brique d'oxyde cuivreux. Le bilan de la réaction est :



3. La fermentation alcoolique :

La fermentation alcoolique est le résultat d'une chaîne de métabolique qui transforme les sucres fermentescibles par des levures en alcool et en dioxyde de carbone.



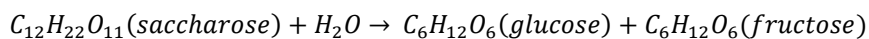
III. Préparation :

1. Hydrolyse de l'amidon :

Lors de la digestion, les molécules d'amidon se dissocient en chaînes glucanes linéaires, elles même dissociées en glucose simples et assimilables par le système digestif. Les amylases présentes dans la salive ainsi que dans le suc pancréatique, permettent l'hydrolyse de l'amidon en dextrines, maltose et glucose. Par suite dans l'intestin, deux enzymes, la maltase et l'isomaltase, finissent l'hydrolyse des dextrines et du maltose en glucose.

2. Inversion du saccharose :

Le saccharose est constitué d'une molécule de glucose et d'une molécule de fructose reliées entre elles. En présence d'eau et d'acide, la liaison se rompt. L'équation de la réaction s'écrit :

**IV. Notion sur les glucides :****Définition :**

Les glucides sont une classe de molécules organiques contenant un groupement carbonyle (aldéhyde ou cétone) et plusieurs groupements hydroxyles (-OH).

Classification :

Les glucides sont habituellement répartis entre **oses** (monosaccharides tel que le glucose, le galactose ou le fructose) et **osides**, qui sont des polymères d'oses (polysaccharides). Seules les monosaccharides et les disaccharides ont un pouvoir sucrant. Les polysaccharides, comme l'amidon, sont insipides.

Importance :

Le glucose est la principale molécule énergétique catabolisée par l'ensemble des cellules de l'organisme. Nos cellules ont besoin de sucre en permanence, le glucose est le carburant de nos cellules.

Chapitre 2 Cinétique chimique

CINÉTIQUE CHIMIQUE

Classe 12^{ème} SE et SB

Discipline : Chimie

Objectifs : L'élève doit être capable de :

- définir la cinétique chimique, les vitesses de disparition d'un réactif, d'apparition d'un produit, la vitesse de la réaction ;
- énoncer les différents types de réaction ;
- définir les facteurs de vitesse d'une réaction ;
- citer les différents facteurs de la vitesse d'une réaction ;
- définir l'ordre d'une réaction, le temps de demi réaction ;
- établir les lois de transformations d'ordre un et deux ;
- définir la catalyse ;
- définir une réaction en chaîne.

I. Définitions :**1. Cinétique chimique :**

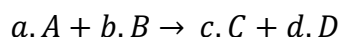
La cinétique a pour but d'étudier l'évolution des réactions chimiques en fonction du temps.

2. Différents types de réactions :

- Une réaction est dite instantanée ou rapide lorsque l'évolution du système est si rapide qu'à nos yeux la réaction semble achevée à l'instant même où les réactifs rentrent en contact.
- Une réaction est dite lente lorsque nos sens permettent de suivre son déroulement
- Un système chimique qui n'évolue pas parce que la réaction naturelle qui peut s'y dérouler est très lente est dit cinétiquement inerte. On dit aussi que la réaction est bloquée.
- Une réaction est totale si l'un des réactifs est entièrement consommé, ce réactif est appelé réactif limitant.
- Une réaction est limitée si seulement une partie des réactifs est consommée.

3. Vitesse de réaction :

Soit la réaction :



Où a, b, c et d sont les coefficients stœchiométriques.

Pour chacun des composés participant à la réaction, on peut définir une vitesse moyenne et une vitesse (instantanée) de formation (pour C et D) ou de disparition (pour A et B).

Soit un corps formé ou un corps qui disparaît.

La vitesse moyenne de formation de X est $v_{mf} = \frac{n_2(X) - n_1(X)}{t_2 - t_1}$.

La vitesse moyenne de disparition de X est $v_{df} = -\frac{n_2(X) - n_1(X)}{t_2 - t_1}$. $n_1(X)$ est le nombre de mole de X à la date t_1 et $n_2(X)$ est le nombre de mole de X à la date t_2 .

La vitesse (instantanée) de formation de X est $v_f = \frac{dn(X)}{dt}$.

La vitesse (instantanée) de disparition de X est $v_d = -\frac{dn(X)}{dt}$.

Si la réaction a lieu dans un volume constant V, la vitesse de formation de X est :

$$v = \frac{1}{V} \frac{dn(X)}{dt} \Rightarrow \frac{d(\frac{n(X)}{V})}{dt} = \frac{d[X]}{dt}.$$

La vitesse de disparition de X est : $v = -\frac{d[X]}{dt}$.

Ainsi :

la vitesse de formation d'un composé X (C ou D) est : $v = \frac{d[X]}{dt}$.

la vitesse de disparition d'un composé X (A ou B) est : $v = -\frac{d[X]}{dt}$.

la vitesse moyenne de formation d'un composé X (C ou D) est : $v = \frac{[X]_2 - [X]_1}{t_2 - t_1}$.

la vitesse moyenne de disparition d'un composé X (A ou B) est : $v = -\frac{[X]_2 - [X]_1}{t_2 - t_1}$.

L'unité de la vitesse de disparition ou de formation d'un composé est mol.s^{-1} ou $\text{mol.L}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

II. Mesure de la vitesse d'une réaction :

1. Méthode chimique :

A divers instants, on fait des prélèvements dans le milieu réactionnel que l'on analyse. Ces prélèvements sont préalablement placés dans un mélange réfrigérant afin d'arrêter l'évolution de la réaction.

On peut consigner les résultats des dosages à divers instants dans un tableau et tracer la courbe $c=f(t)$ de formation d'un produit ou de disparition d'un réactif.

La vitesse de la réaction à un instant t est égale à la pente de la tangente à la courbe au point d'abscisse t.

La vitesse moyenne entre deux instants t_1 et t_2 est la pente de la sécante à la courbe aux points t_1 et t_2 . Fig. 1.

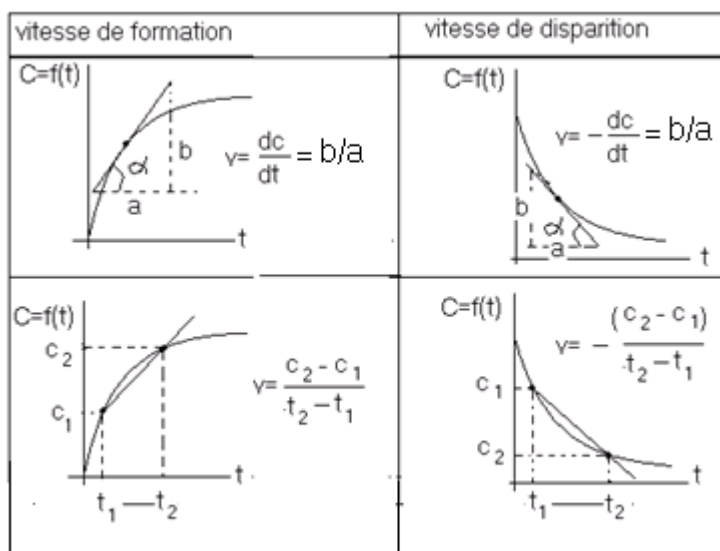


Fig. 1

2. Méthode physique:

Elle consiste à suivre la variation d'une grandeur physique (pression, pouvoir rotatoire, ect) dont la valeur est liée aux concentrations des constituants du mélange réactionnel.

Ex : la décomposition du carbonate de calcium à 900°C. $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$

On peut mesurer la vitesse de la réaction par rapport au dioxyde de carbone en mesurant la pression du gaz.

$$v = \frac{dC}{dt}, \text{ or } C = \frac{n}{V} \text{ et } PV=nRT \Rightarrow P = \frac{n}{V}RT = C \cdot RT \text{ d'où } v = \frac{1}{RT} \frac{dP}{dt}.$$

n est la quantité de matière de CO_2 , C sa concentration, P sa pression.

La méthode physique a l'avantage de ne pas perturber le milieu réactionnel.

III. Facteurs de la vitesse d'une réaction :

Les facteurs de vitesse ou facteur cinétique sont les paramètres dont la variation peut influencer l'évolution de la réaction chimique. Les principaux facteurs cinétiques sont : la température, le catalyseur et la concentration des réactifs.

1. Influence de la température :

La vitesse de formation des produits d'une réaction (ou de disparition des réactifs) augmente avec la température.

Pour de nombreuses réactions, une augmentation de la vitesse de 10°C double la vitesse.

2. Influence du catalyseur :

Un catalyseur accélère une réaction chimique.

Le catalyseur forme avec le réactif une espèce intermédiaire qui réagit très rapidement pour donner le produit. Si le catalyseur est solide, le réactif est absorbé à la surface où se forme l'intermédiaire.

3. Influence de la concentration : loi de Van't Hoff

La vitesse de formation des produits (ou celle de disparition des réactifs) dépend des concentrations initiales des réactifs. Plus la concentration des réactifs est grande, plus la vitesse de formation (ou de disparition) est élevée.

Au cours d'une réaction chimique, la concentration des réactifs diminue, ce qui entraîne une diminution de la vitesse de la réaction.

IV. Ordre d'une réaction :

1. Expression de la vitesse selon Van't Hoff :

A température constante, la vitesse d'une réaction est proportionnelle au produit des concentrations des réactifs affectés chacun d'un exposant égale au nombre de moles de corps réagissant dans le milieu réactionnel.

Ainsi pour la réaction : $a.A + b.B \rightarrow c.C + d.D$

$$v = k \cdot [A]^a \cdot [B]^b, \text{ K est la constante de vitesse.}$$

Pour la réaction : $a.A + b.B \rightarrow c.C + d.D$, on peut écrire $\frac{n_A}{a} = \frac{n_B}{b} = \frac{n_C}{c} = \frac{n_D}{d}$.

Si on compte positivement les quantités formées et négativement les quantités consommées par la réaction on a :

$$-\frac{n_A}{a} = -\frac{n_B}{b} = \frac{n_C}{c} = \frac{n_D}{d} \Rightarrow -\frac{dn_A}{dt} = -\frac{dn_B}{dt} = \frac{dn_C}{dt} = \frac{dn_D}{dt}.$$

Pour une réaction à volume constant, cette dernière relation conduit, en divisant par Vdt , à : $-\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{c} \frac{d[C]}{dt} = \frac{1}{d} \frac{d[D]}{dt}$ ou $\frac{v_{dA}}{a} = \frac{v_{dB}}{b} = \frac{v_{fC}}{c} = \frac{v_{fD}}{d}$.

Ainsi, les vitesses de formation et de disparition des produits et des réactifs sont liées par une relation simple.

On appelle vitesse de la réaction chimique considérée la grandeur v définie par :

$$v = -\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{c} \frac{d[C]}{dt} = \frac{1}{d} \frac{d[D]}{dt}.$$

2. Molécularité d'une réaction :

La molécularité en chimie est le nombre d'entités élémentaires (ions, molécules) qui entrent simultanément en contact lors d'une réaction élémentaire. Ce nombre est égal à la somme des coefficients stœchiométriques des réactifs.

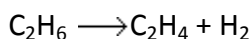
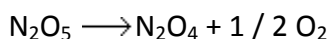
3. Ordre d'une réaction :

Dans de nombreux cas, la vitesse de la réaction est de la forme : $v = k \cdot [A]^p \cdot [B]^q$, avec $p \neq a$ et $q \neq b$.

La somme $p+q$ est l'ordre global de la réaction, p est l'ordre partiel de A et q est l'ordre partiel de B.

Remarque : Dans le cas d'une réaction simple, les exposants p et q sont égaux aux coefficients stœchiométriques a et b .

Exemples de réaction d'ordre global 1 : réaction de décomposition



Exemples de réaction d'ordre global 2 :

Réactions d'estérification : acide + alcool $\longrightarrow$ ester + eau

Réactions d'hydrogénation : $I_2 + H_2 \longrightarrow 2HI$

4. Lois de transformation :

a. Réaction d'ordre 1 : Ce sont des réactions du type : $A \longrightarrow B + P$ avec une vitesse de réaction

$$V = -\frac{d[A]}{dt} = k \cdot [A] \Rightarrow -\frac{d[A]}{dt} = k \cdot [A] \Rightarrow -\frac{d[A]}{[A]} = k \cdot dt$$

En intégrant : $-\ln[A] = kt + cte$

$$\text{A la } t=0 \text{ } [A] = [A]_0 \Rightarrow -\ln[A]_0 = cte \Rightarrow -\ln[A] = kt - \ln[A]_0 \\ \Rightarrow \ln[A]_0 - \ln[A] = kt$$

$$\text{On a donc : } \ln \frac{[A]_0}{[A]} = kt \text{ ou } \frac{[A]_0}{[A]} = e^{kt} \Rightarrow \frac{[A]}{[A]_0} = e^{-kt} \text{ ainsi : } \\ [A] = [A]_0 \cdot e^{-kt}.$$

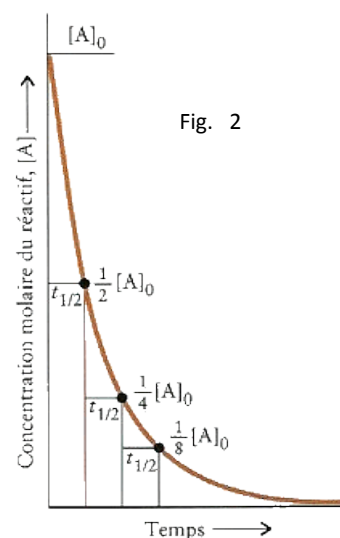


Fig. 2

Dans une réaction d'ordre un, la concentration des réactifs décroît exponentiellement avec le temps.

Temps de demi réaction d'une réaction d'ordre un :

Définition : On appelle temps de demi-réaction $t_{1/2}$ le temps au bout duquel la moitié du réactif limitant a été consommé.

$$A \text{ à } t_{1/2} [A] = \frac{[A]_0}{2} \Rightarrow \frac{[A]_0}{2} = [A]_0 \cdot e^{-kt_{1/2}} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{2} = e^{-kt_{1/2}} \Rightarrow -\ln 2 = -kt_{1/2}$$

$$\text{On a donc : } t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}.$$

Remarque : le temps de demi réaction d'une réaction d'ordre un est indépendant de la concentration de la substance réagissante.

b. Réaction d'ordre 2

Soit la réaction $A + B \longrightarrow R + P$

Nous savons que $V = k[A][B] = -\frac{d[A]}{dt} = -\frac{d[B]}{dt}$

Considérons un mélange équimoléculaire de A et de B

Si au temps $t=0$ nous avons $[A_0] = [B_0]$ donc au temps $[A] = [B]$

$$\text{alors } V = k[A][B] = k[A]^2 = -\frac{d[A]}{dt}$$

L'intégration de cette loi de vitesse pour une réaction d'ordre deux nous permet de prévoir la concentration du réactif qui reste au temps t .

$$\text{Soit : } kdt = -\frac{d[A]}{A^2}$$

En intégrant :

$$kt + cte = \frac{1}{[A]}$$

$$\text{A } t=0 [A] = [A]_0 \Rightarrow 0 + cte = \frac{1}{[A]_0} \Rightarrow kt + \frac{1}{[A]_0} = \frac{1}{[A]}$$

D'où

$$\boxed{\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = kt}$$

Ainsi pour une réaction élémentaire $A + R \longrightarrow B + P$ d'ordre global 2, le graphe représentant l'inverse de la concentration en réactif A en fonction du temps sera une droite de pente k (constante de vitesse) et d'ordonnée à l'origine $1/[A_0]$
L'unité de la constante k sera donc en $L \cdot mol^{-1} \cdot t^{-1}$.

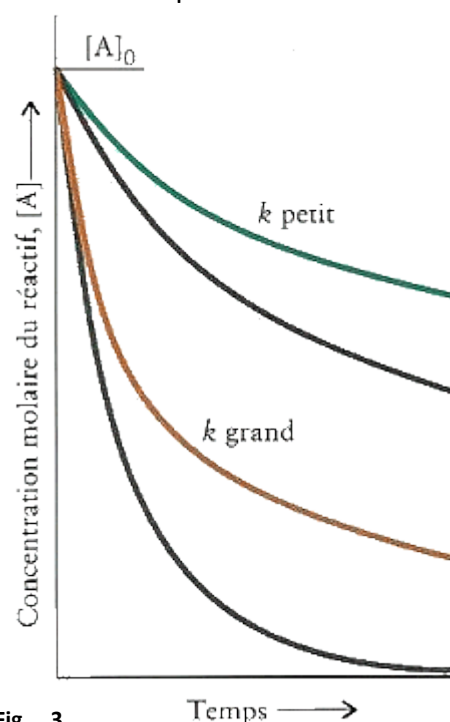


Fig. 3

Temps de demi-réaction :

$$\text{A la date } t = t_{1/2}, [A] = \frac{[A]_0}{2} \Rightarrow \frac{1}{\frac{[A]_0}{2}} - \frac{1}{[A]_0} \Rightarrow \frac{2}{[A]_0} - \frac{1}{[A]_0} = kt_{1/2} \Rightarrow \frac{1}{[A]_0} = kt_{1/2}$$

Ainsi :

$$t_{1/2} = \frac{1}{k[A]_0}$$

Remarque : le temps de demi-réaction pour une réaction d'ordre 2 dépend de la concentration initiale.

V. Catalyse :**1. Définition :**

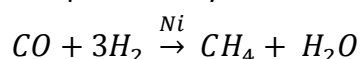
Un catalyseur est un corps qui accélère une réaction chimique naturelle sans subir lui-même de modifications permanente.

La catalyse est l'ensemble des phénomènes liés à l'utilisation d'un catalyseur.

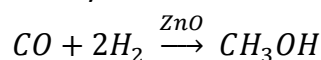
2. Propriétés :

- un catalyseur ne modifie que la vitesse d'une réaction ; il peut rendre possible des réactions bloquées, mais pas des réactions thermodynamiquement impossibles ;
 - un catalyseur est un composé qui n'apparaît pas dans le bilan d'une réaction chimique, bien qu'il participe à son mécanisme en étant successivement consommé et régénéré ;
 - un catalyseur ne modifie pas la composition du mélange réactionnel à l'équilibre lors de la réalisation d'une réaction équilibrée ;
 - tout catalyseur d'une réaction l'est également de la réaction inverse ;
 - lorsque plusieurs réactions sont possibles à partir des mêmes réactifs, un catalyseur est souvent spécifique : il ne catalyse que l'une d'entre elles. On dit que catalyseur est sélectif.
- Par exemple, un mélange de dihydrogène et de mono oxyde de carbone donne :

- ❖ du méthane et de la vapeur d'eau lorsque le catalyseur est le nickel ;



- ❖ du méthanol lorsque le catalyseur est l'oxyde de zinc ZnO.

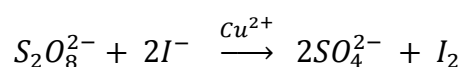


- Quand des composés s'établissent sur la surface d'un catalyseur et empêchent aux réactifs de s'y fixer utilement, on dit que le catalyseur est empoisonné.

3. Catalyse homogène :

Une catalyse est dite homogène lorsque le catalyseur appartient à la même phase que les réactifs.

Exemple : Oxydation d'une solution d'iodure par une solution de peroxodisulfate catalysée par une solution d'ion Cu^{2+} .



4. Catalyse hétérogène :

Une catalyse est dite hétérogène lorsque le catalyseur n'appartient pas à la même phase que les réactifs.

Exemple : dans la réaction $CO + 3H_2 \xrightarrow{Ni} CH_4 + H_2O$, l'oxyde de carbone et le dihydrogène sont des gaz et le nickel est solide.

5. Autocatalyse :

Une réaction chimique catalysée par l'un de ses produits est dite autocatalytique. Ce type de catalyse est appelé autocatalyse.

Dans une autocatalyse, deux facteurs agissent en sens inverse :

- d'une part, l'augmentation de la concentration du catalyseur produit par la réaction tend à augmenter la vitesse de disparition des réactifs ;
- d'autre part, la diminution des concentrations des réactifs, au fur et à mesure que la réaction s'effectue, tend à faire diminuer cette même vitesse.

Il en résulte que, dans un premier temps, la réaction s'accélère. Dans un second temps, on observe une décélération.

La vitesse de la réaction passe par un maximum, la courbe $C=f(t)$ passe par un point d'inflexion.

VI. Mécanisme réactionnel :

1. Définition :

Une réaction élémentaire est une réaction s'effectuant réellement au niveau des particules.

Les particules, en générale une ou deux rarement trois, qui donnent naissance à une réaction élémentaire peuvent être des molécules, des ions ou des radicaux.

Un radical est une particule neutre possédant un électron célibataire noté par un point.

Un radical est instable, c'est un intermédiaire réactif : « un centre actif ».

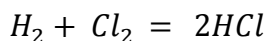
Une réaction simple est une réaction en une seule étape ou processus élémentaire avec au maximum trois molécules de réactifs. Si les ordres partiels sont égaux aux coefficients stœchiométriques, la réaction est dite élémentaire.

Une réaction complexe est une réaction en plusieurs étapes successives ou parallèles.

Ainsi les réactions qui n'ont pas les ordres partiels égaux aux coefficients stœchiométriques se déroulent par un ensemble de réactions élémentaires.

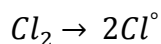
2. Exemple de réaction en chaîne :

La synthèse du chlorure d'hydrogène a pour bilan :



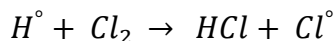
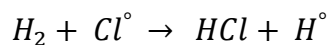
Cette réaction est le résultat d'une succession de réactions élémentaires que l'on classe en trois étapes.

- ❖ La première étape est un acte élémentaire conduisant à la formation de deux radicaux $Cl^\bullet$ selon :



Cette étape est appelée initiation ou amorçage.

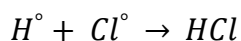
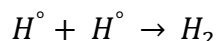
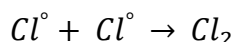
- ❖ La deuxième étape est constituée de deux actes élémentaires. Ces deux réactions constituent une séquence qui se répète indéfiniment l'un à la suite de l'autre.



Elle ne peut commencer que si un radical Cl° est présent. Il se forme HCl et Cl° est régénéré.

Cette étape est l'étape de propagation.

- ❖ La troisième étape est constituée de trois actes élémentaires.



Elle met fin à la propagation car elle consomme des radicaux sans en régénérer. C'est pourquoi elle est appelée étape de terminaison ou de rupture ou d'arrêt.

Définition d'une réaction en chaîne :

Une réaction dont le mécanisme est constituée d'une étape d'initiation, d'une étape de propagation et d'une étape de rupture est appelée réaction en chaîne.

3. Rôles des radiations :

La formation des deux radicaux Cl° résulte de la rupture de la liaison de covalence Cl-Cl. Industriellement, cette rupture est réalisée par chauffage. Lorsque l'initiation a lieu sous l'effet de la chaleur, on dit qu'il y a **thermolyse**.

Aussi, la rupture peut être causée par une lumière convenable. L'initiation sous l'effet de la lumière est appelée **photolyse**.

L'énergie apportée par un photon est donnée par $E = h\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$, où h est la constante de Planck ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$), c la vitesse de la lumière ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$), et ν et λ respectivement la fréquence et la longueur d'onde de la lumière utilisée.

Pour être efficace, un photon doit transporter au moins l'énergie de rupture d'une molécule de dichlore E_d (pour le dichlore $E_d = 4,03 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) : $E \geq E_d$.

Pour dissocier une mole de dichlore, l'énergie apportée par les photons est :

$$E = N_A \cdot h\nu = N_A \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

N_A est le nombre d'Avogadro, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Chapitre 3 Équilibre chimique

ÉQUILIBRE CHIMIQUE

Classe : 12eme SB et SE

Discipline : Chimie

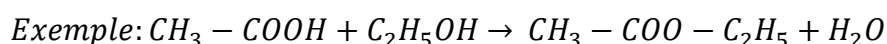
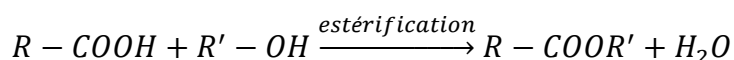
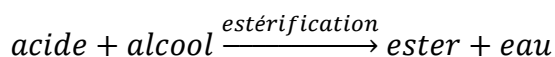
Objectifs :

- définir une réaction d'estérification, d'hydrolyse (à partir d'exemples) ;
- énoncer les produits des réactions d'estérification et d'hydrolyse ;
- citer les propriétés des réactions d'estérification et d'hydrolyse ;
- expliquer la notion d'équilibre chimique ;
- définir les termes de phase, de système, de constituants, de variance ;
- énoncer la loi de déplacement des équilibres et la loi d'action des masses
- établir les expressions de la constante d'équilibre relative aux concentrations et de la constante d'équilibre relative aux pressions et de déduire la relation entre elles ;
- définir le coefficient de dissociation.

I. Réaction d'estérification

1. Définition

On appelle estérification l'action d'un alcool sur un acide carboxylique pour donner un ester et de l'eau.



2. Propriétés:

- La réaction d'estérification est athermique : elle ne consomme ni ne produit de la chaleur.
- La réaction d'estérification est lente : à 100°C, il faut plusieurs heures pour que la réaction n'évolue plus.
- La réaction d'estérification est limitée : Lorsque la réaction n'évolue plus, l'acide, l'alcool, l'ester et l'eau coexistent sans modification sensible de leur composition relative.

3. Courbe :

L'étude de l'évolution au cours du temps d'un mélange équimolaire d'acide éthanoïque et d'éthanol permet d'établir le graphe $n_{\text{ester}}(t) = n_a^0 - n_a(t)$: Fig. 1.

Le rendement de cette réaction est :

$$r = \frac{n_{\text{ester}}^f}{n_a^0} = \frac{n_a^0 - n_a^f}{n_a^0} = 0,67 \text{ soit } 67\%$$

n_{ester}^f et n_a^f désignent respectivement les quantités d'ester et d'acide lorsque le système n'évolue plus.

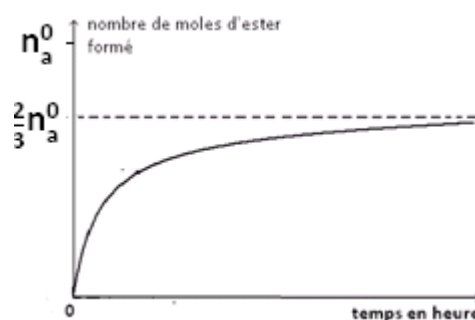
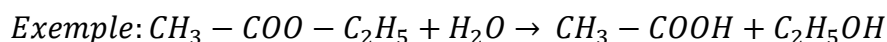
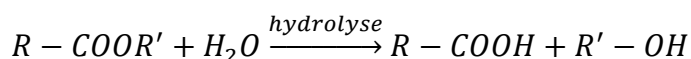
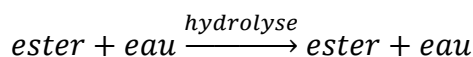


Fig. 1

II. Hydrolyse

1. Définition :

L'hydrolyse d'un ester est son action sur l'eau, on obtient un acide carboxylique et un alcool.



2. Propriétés

L'hydrolyse d'un ester est une réaction, lente, limitée et athermique.

3. Courbe :

L'étude de l'évolution au cours du temps d'un mélange équimolaire éthanoate d'éthyle et d'eau permet d'établir le graphe : fig. 2.

$$n_{\text{ester}}^{\text{restant}} = f(t).$$

Le rendement de la réaction est :

$$r = \frac{n_a^f}{n_e^0} = \frac{1}{3} \text{ soit } 33\%$$

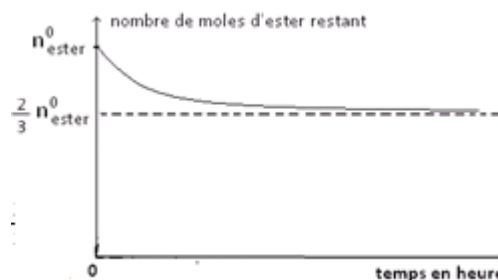


Fig. 2

III. Équilibre estérification hydrolyse :

1. Mise en évidence de l'équilibre :

Les réactions d'estérification et d'hydrolyse sont inverses l'une de l'autre et ont lieu simultanément. Elles évoluent vers le même état d'équilibre.

C'est un équilibre dynamique dans lequel les réactifs et les produits coexistent dans des proportions constantes.

L'équilibre est atteint lorsque les vitesses des réactions d'estérification et d'hydrolyse sont égales. Il est alors produit autant de réactifs par la réaction directe qu'il en est consommé par la réaction inverse.

2. Influence du catalyseur :

Le catalyseur est l'ion H_3O^+ (ion hydronium) apporté par une solution d'acide sulfurique.

Le catalyseur accélère de la même façon les deux réactions inverses l'une de l'autre, il ne modifie pas l'état d'équilibre, mais permet de l'atteindre plus rapidement.

3. Influence de la température :

La réaction est athermique, la modification de température est sans effet sur l'état d'équilibre du système. Par contre son élévation permet d'atteindre l'état d'équilibre plus rapidement sans le modifier.

4. Influence de la nature des réactifs :

Dans l'équilibre estérification hydrolyse, le rendement de l'estérification dépend très peu de la nature de l'acide, mais beaucoup de la classe de l'alcool utilisé.

Pour un mélange équimolaire acide + alcool le rendement de l'estérification est de 67% pour un alcool primaire, 60% pour un alcool secondaire et 5% pour un alcool tertiaire.

5. Influence des proportions initiales :

Le rendement par rapport au réactif limitant de l'estérification est d'autant plus important que l'autre réactif est en plus fort excès.

Le rendement par rapport au réactif limitant de l'hydrolyse est d'autant plus important que l'autre réactif est en plus fort excès.

IV. Notion d'équilibre chimique :

1. Définitions :

a. Équilibre chimique :

Un système est en équilibre chimique, si dans des conditions expérimentales identiques on peut aboutir à un ensemble de réactions réversibles c'est-à-dire inverse l'une et limitées.

b. Notion de phase :

On appelle phase toute partie homogène de substance d'un système.

Les propriétés physiques sont les mêmes en tout point d'une phase.

- ❖ Un mélange gazeux constitue une phase.
- ❖ Deux liquides miscibles constituent une phase.
- ❖ Il y a autant de phase que de liquides non miscibles ;
- ❖ Il y a autant de phase qu'il y a de solides.

2. Différents types d'équilibre :

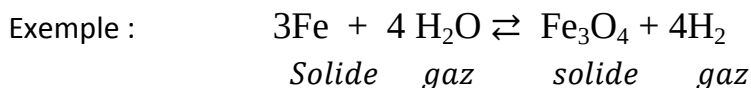
- a. **Équilibre réversible** : Lorsque deux réactions inverses ont lieu simultanément dans les mêmes conditions expérimentales, aucune de ces réactions ne peut être complète.

- b. **Équilibre homogène** : L'équilibre est dit homogène lorsqu'il ne comporte qu'une phase.



c. Équilibre hétérogène :

Lorsqu'un système comporte plus d'une phase il est dit hétérogène.



d. Équilibre métastable :

On les appelle des faux équilibres

A l'abri de la lumière un mélange de H_2 et de Cl_2 est en équilibre. Il suffit d'éclairer le système pour rendre la réaction complète avec formation de HCl .

V. Facteurs d'équilibres :

1. Définition :

On appelle facteurs d'équilibre, les paramètres (variable indépendants) dont la variation peut entraîner la modification de l'état d'équilibre.

En général ce sont la température, pression (facteurs physiques) et la concentration molaire des constituants (facteurs chimiques).

2. Lois qualitatives : lois de déplacement

a. Loi générale : loi de modération :

Toute perturbation de l'état d'équilibre d'un système provoque la réaction qui tend par ses effets à s'opposer à cette perturbation.

b. Loi de Van't Hoff :

❖ Thermicité d'une réaction :

On appelle chaleur de réaction Q_r à la température t , la quantité de chaleur échangée entre le milieu extérieur et le milieu réactionnel.

Lorsque la réaction est endothermique, le système reçoit la quantité de chaleur Q_r du milieu extérieur. Conventionnellement, cette quantité de chaleur est comptée positivement.

Lorsque la réaction est exothermique, le système cède la quantité de chaleur Q_r au milieu extérieur. La valeur de cette quantité de chaleur négative.

Lorsque la réaction est athermique, le système n'échange pas de chaleur avec le milieu extérieur $Q_r = 0$.

Pour une réaction réversible, la chaleur d'une réaction est l'opposé de la réaction inverse.

❖ Énoncé de la loi :

A volume constant et sous pression constante, une élévation de la température déplace l'équilibre dans le sens de la réaction **endothermique**. Un abaissement de la température déplace l'équilibre dans le sens de la réaction exothermique.

Exemple : $N_2 + 3H_2 \xrightleftharpoons[2]{1} 2NH_3 - 12,350kcal$

$Q = -12,350kcal < 0$, la réaction 1 est exothermique, la réaction 2 est endothermique.

Une augmentation de la température déplace l'équilibre dans le sens de la réaction 2, un abaissement de la température déplace l'équilibre dans le sens de la réaction 1.

c. Loi de Le Chatelier :

A température constante, une augmentation de la pression déplace l'équilibre dans le sens de la réaction qui s'effectue avec une diminution de volume donc du nombre de moles gazeux. Une diminution de la pression déplace l'équilibre dans le sens de la réaction qui s'effectue avec un accroissement du volume donc du nombre total de moles gazeux.

Exemple : $N_2 + 3H_2 \xrightleftharpoons[2]{1} 2NH_3$, N_2 , H_2 et NH_3 sont des gaz.

Une augmentation de la pression déplace l'équilibre dans le sens de la réaction 1 (le nombre de mole gazeux diminue 4moles à 2moles). Une diminution de la pression déplace l'équilibre dans le sens de la réaction 2 (le nombre de moles gazeux augmente de 2moles à 4 moles).

d. Loi des concentrations :

Une augmentation de la quantité d'un constituant déplace l'équilibre dans le sens de la réaction qui élimine ce constituant. Une diminution de la quantité d'un constituant déplace l'équilibre dans le sens de la réaction qui produit ce constituant.

N.B. : Les variations de pression sont sans effet sur les réactions qui s'effectuent à volume constant (telles que les réactions acido-basiques en solution aqueuse) ou sans variation de nombre de moles.

3. Lois quantitatives : lois d'action des masses :

a. Loi d'action des masses relative aux concentrations :

Soit le système homogène : $n A + m B \rightleftharpoons p C + q D$

$V_1 = K_1 [A]^n [B]^m$ et $V_2 = K_2 [C]^p [D]^q$

A l'équilibre $V_1 = V_2 \Leftrightarrow K_1 [A]^n [B]^m = K_2 [C]^p [D]^q$

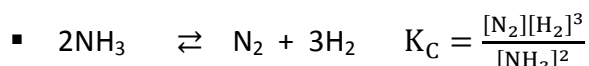
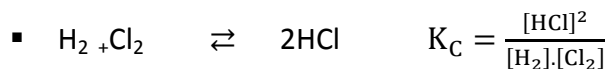
$$\Rightarrow \frac{K_1}{K_2} = K_C = \frac{[C]^p [D]^q}{[A]^n [B]^m}$$

K_C : Constante d'équilibre relative aux concentrations molaires; elle ne dépend que de la température.

Enoncé : Dans un système chimique en équilibre homogène à une température donnée, il existe un rapport constant entre les produits des concentrations molaires des corps formés d'une part et des corps réagissant d'autre part ; chacune d'entre elles affectées d'un exposant égal au nombre de moles qui participent à la réaction.

$$K_C = \frac{[C]^p [D]^q}{[A]^n [B]^m}$$

Exemple :



b. loi d'action des masses relative aux pressions partielles

Soit l'équilibre en phase gazeuse : $n \text{ A} + m \text{ B} \rightleftharpoons p \text{ C} + q \text{ D}$ avec A, B, C, D des gaz

Pour le gaz A la pression est P_A donc :

$P_A = n_A R \cdot T$ (V =volume du mélange et T = température absolue, $R = 8,32 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \text{K}^{-1}$ est la constante des gaz parfaits).

$$P_A = \frac{n_A}{V} R \cdot T \Rightarrow P_A = [A] R \cdot T \Rightarrow [A] = \frac{P_A}{R \cdot T}$$

$$\text{De la même manière : } [B] = \frac{P_B}{R \cdot T} ; [C] = \frac{P_C}{R \cdot T} ; [D] = \frac{P_D}{R \cdot T}$$

$$K_C = \frac{[C]^p [D]^q}{[A]^n [B]^m} = \frac{\left(\frac{P_C}{R \cdot T}\right)^p \left(\frac{P_D}{R \cdot T}\right)^q}{\left(\frac{P_A}{R \cdot T}\right)^n \left(\frac{P_B}{R \cdot T}\right)^m} = \frac{P_C^p \cdot P_D^q}{P_A^n \cdot P_B^m} \cdot R \cdot T^{((n+m)-(p+q))} \cdot K_P = \frac{P_C^p \cdot P_D^q}{P_A^n \cdot P_B^m} ;$$

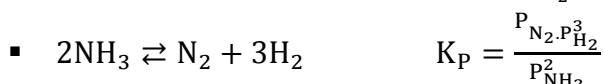
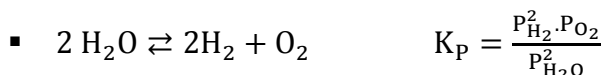
K_P est appelée constante d'équilibre relative aux pressions partielles ; elle ne dépend que de la température.

Remarque : Si $(p + q) = (n + m)$ alors : la pression n'est pas un facteur d'équilibre et $K_C = K_P$

Enoncé : Dans un système chimique en équilibre homogène il existe un rapport constant entre les produits des pressions partielles des corps formés d'une part et celle des corps réagissant d'autre part chacune d'elles étant affectées d'un nombre égal au nombre de moles des corps qui participent à la réaction.

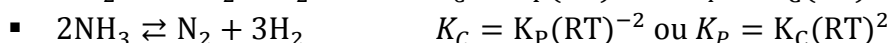
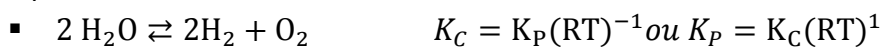
$$K_P = \frac{P_C^p \cdot P_D^q}{P_A^n \cdot P_B^m}$$

Exemple :



c. Relation entre K_C et K_P : $K_C = k_p \cdot (RT)^{\Delta n}$; $\Delta n = (n + m) - (p + q)$.

Exemple :



d. Coefficient de dissociation

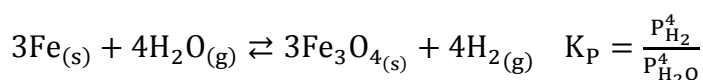
Le Coefficient de dissociation notée α représente la fraction de mole dissociée ou plus exactement le degré d'avancement de la réaction

$$\alpha = \frac{x \leftarrow \text{nombre de moles dissociées}}{n \leftarrow \text{nombre de initiale}} \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

e. Cas d'un système hétérogène

Dans le cas de l'application de la loi d'action des masses à un équilibre hétérogène, on ne fait intervenir dans l'expression de la constante d'équilibre que les constituants de la phase gazeuse ou liquide (on ne tient pas compte des phases solides).

Exemples :

**Remarque :**

Relation entre pressions partielles, pression totale et le nombre de moles

$$n_T = \sum n_i \quad \text{et} \quad P_T = \sum P_i ; P_T = \frac{n_T R \cdot T}{V} \quad (1) \quad \text{et} \quad P_i = \frac{n_i R \cdot T}{V} \quad (2)$$

$$\frac{(1)}{(2)} \Leftrightarrow \frac{P_T}{n_T} = \frac{P_i}{n_i} \quad \text{ou} \quad \frac{P_T}{P_i} = \frac{n_T}{n_i}$$

VI. Variance :**1. Définition :**

On appelle variance d'un système le nombre de paramètres que l'on peut faire varier indépendamment sans changer le nombre de phases.

2. Constituant indépendant d'un système :

Dans un système en équilibre, le nombre C de constituant indépendant est égal au nombre N de constituant figurant dans l'équation chimique diminué de l'unité.

$$\boxed{C = N - 1}$$

3. Règle des phases :

La variance d'un système est donnée par la relation :

$$v = C + n - \varphi$$

- C est le nombre de constituant indépendant ;
- n correspond à la contribution de la température et/ou de la pression (1 si seul la température intervient, ou 2 si la pression intervient également).
- φ est le nombre de phases.

Chapitre 4 Acide base en solution aqueuse

A ACIDES et BASE EN SOLUTION AQUEUSE- IONISATION DE L'EAU ; PRODUIT IONIQUE DE L'EAU- NOTION de pH

Objectifs: L'élève doit capable de :

- Définir un électrolyte
- Définir le pH d'une solution aqueuse
- Etablir l'expression du produit ionique de l'eau
- Préciser la nature d'une solution à l'aide de son pH
- Indiquer une méthode pratique de mesure du pH
- Calculer le pH d'une solution, les concentrations des espèces en solution

I. Définition d'un électrolyte

1. Définition

On appelle électrolyte toute substance, qui, dissoute dans l'eau, donne naissance à des ions et qui communique à cette solution le pouvoir de conduire le courant électrique.

2. Electrolytes forts

Les électrolytes forts sont des substances qui sont totalement dissoutes en ions quelle que soit la dilution dans un solvant.

Exemples : Les solutions aqueuses de HCl ; HNO₃ ; H₂SO₄ ; KOH ; Ca(OH)₂ et tous les sels solubles.

3. Electrolytes faibles

Ce sont des substances sont partiellement dissociées en solution.

Exemples : Solution aqueuses de HNO₂ ; CH₃-COOH ; H₂S ; NH₄OH.

II. Equilibre ionique de l'eau

1. Conductivité de l'eau pure :

Des mesures électriques très soignées utilisant de l'eau pure (eau ayant subi plusieurs purifications successives par distillation) et un détecteur de courant très sensible ont permis d'établir la propriété :

L'eau pure est légèrement conductrice de courant électrique.

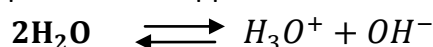
Ce fait expérimental prouve que l'eau pure contient des porteurs de charge en faible quantité : des ions. Ces ions proviennent de l'ionisation des molécules d'eau.

2. Autoprotolyse de l'eau

L'eau pure est électrolyte très faible, une liaison O-H peut se rompre pour libérer un proton qui est transféré à une autre molécule d'eau et donne naissance à l'ion H₃O⁺.

En fait, à une température donnée un état d'équilibre chimique apparaît, impliquant que la composition H₂O ; H₃O⁺ et OH⁻ ne varie pas.

A cet équilibre correspond un équation-bilan appelée réaction d'autoprotolyse de l'eau.



3. Produit ionique de l'eau

A 25°, dans l'eau pure : $[H_3O^+] = [OH^-] = 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$

Dans toute solution aqueuse, à une température donnée, le produit des concentrations des ions hydroniums H_3O^+ et des ions hydroxydes OH^- est constant. Ce produit est appelé **produit ionique de l'eau** et est noté K_e . K_e est sans dimension et il dépend de la température.

$$K_e = [H_3O^+]. [OH^-]$$

A 25°C $K_e = 10^{-14}$.

III. pH d'une solution aqueuse

1. définition

Le pH d'une solution aqueuse est l'opposée du logarithme décimal de sa concentration en ion hydronium, exprimée en mol.L^{-1} par : $\text{pH} = -\log[H_3O^+]$

Cette relation est équivalente à : $[H_3O^+] = 10^{-\text{pH}} \text{ en mol.L}^{-1}$

Exemple : considérons deux solutions où les concentrations en ions hydronium valent respectivement $10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ et $10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$

$[H_3O^+] = 10^{-2} \Rightarrow \text{pH} = 2$; Pour $\text{pH}=3,6$: $[H_3O^+] = 10^{-3,6} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$

Plus le pH d'une solution est petit, plus la concentration $[H_3O^+]$ dans cette solution est grande et inversement.

2. Validité des formules $K_e = [H_3O^+]. [OH^-]$ et $\text{pH} = -\log[H_3O^+]$:

Ces formules sont approchées. Elles ne sont valables que si les concentrations en espèces ioniques et moléculaires sont faibles ($\leq 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$).

- Pour une solution aqueuse de chlorure d'hydrogène à $0,10 \text{ mol.L}^{-1}$: $\text{pH}=1,1$ au lieu de 1 avec la formule.
- Pour une solution aqueuse de chlorure de sodium à $0,10 \text{ mol.L}^{-1}$ et dans laquelle on a dissous $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ de chlorure d'hydrogène : $[H_3O^+] = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ et la valeur du pH mesuré est $\text{pH}=2,3$ et non 2.
- Pour une solution aqueuse de chlorure de sodium à $0,10 \text{ mol.L}^{-1}$, à 25°C, les mesures montrent que : $[H_3O^+]. [OH^-] = 2 \cdot 10^{-14}$.

Ceci s'interprète par des interactions entre ions, négligeables en solution diluée, mais importantes en solution plus concentrée.

3. Solutions acides, solutions basiques :

Une solution aqueuse est dite :

- acide si $[H_3O^+] > [OH^-]$ à 25°C $\text{pH} < 7$;
- basique si $[H_3O^+] < [OH^-]$ à 25°C $\text{pH} > 7$;
- neutre si $[H_3O^+] = [OH^-]$ à 25°C $\text{pH}=7$.

4. Relation d'électroneutralité :

Soit une solution contenant en plus des ions $[H_3O^+]$ et $[OH^-]$ des anions $A^{\alpha-}$ et des cations $C^{\beta+}$. La relation : $[H_3O^+] + \beta[C^{\beta+}] = [OH^-] + \alpha[A^{\alpha-}]$ traduit la neutralité de la charge globale apportée par les ions. **C'est la relation d'électroneutralité.**

Exemple : Pour une solution de chlorure de calcium.

5. Mesure de pH

Il existe deux méthodes pour connaître le pH d'une solution :

- La première, qui utilise le papier pH est rapide, mais peu précise
- La seconde nécessite l'emploi d'un appareil élaboré : le pH-mètre. Elle permet d'obtenir un résultat précis.

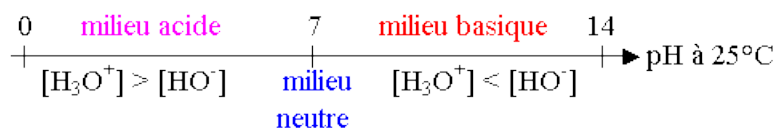
I. **Papier pH** : Le papier indicateur de pH ou papier pH utilise les propriétés des indicateurs colorés. Il est obtenu par imprégnation avec une solution contenant un mélange d'indicateurs colorés, puis séchage.

Quand on dispose quelques gouttes d'une solution de pH inconnu, celui-ci prend une couleur dépendant du pH de la solution.

La couleur prise par le papier pH permet de déterminer l'ordre de grandeur du pH par comparaison avec une gamme de couleur **accompagnant le rouleau**

II. **Le pH-mètre** : La détermination du pH d'une solution s'effectue en y plongeant une électrode de verre et une électrode de référence reliées un pH-mètre. Le pH est obtenu par lecture directe sur le cadran de l'appareil.

III. **Echelle de pH** : Les concentrations molaires en H_3O^+ et OH^- dépassent rarement 10 mol.L^{-1} . Ceci correspond à des valeurs limites de pH allant approximativement de -1 à 15. Pour des commodités d'ordre technologique les pH-mètres ont généralement une échelle qui va de 0 à 14.



Actuellement avec les appareils numériques ces échelles s'étendent de -5 à 15.

IV. Solution aqueuse de chlorure d'hydrogène

1. Etude qualitative

a. Mise en solution

La mise en solution du chlorure d'hydrogène dans l'eau possède trois propriétés remarquables ;

- Le HCl est très soluble dans l'eau
- La mise en solution de HCl dans est extrêmement rapide
- La mise en solution de HCl dans l'eau est exothermique

b. Caractère ionique

- Les solutions d'acides chlorhydriques sont conductrices de courant. Donc elle renferme des ions.
- Si l'on fait réagir une solution de nitrate d'argent ($\text{Ag}^+ + \text{NO}_3^-$), il se forme un précipité blanc de chlorure d'argent AgCl : la solution contient des **ions Cl^-**
- L'hélianthine rougit dans la solution d'acide chlorhydrique : la solution contient des **ions H_3O^+**
- Les solutions d'HCl contiennent des ions H_3O^+ et des ions Cl^-
- L'équation bilan de la réaction s'écrit : $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{Cl}^-$

2. Etude quantitative

a. Espèces minoritaire, ultra minoritaire, majoritaire, ultra majoritaire

- Une espèce chimique A est minoritaire devant une espèce chimique B si : $\frac{[A]}{[B]} \leq 0,1$ B est alors majoritaire.
- Une espèce chimique A est ultraminoritaire devant une espèce B si : $\frac{[A]}{[B]} < 10^{-4}$

b. Calcul de la concentration des chimique en solution

Etudions une solution de HCl de concentration $C_a = 10^{-2}$, $pH = 2$ à $25^\circ C$

On considère qu'il reste à priori des molécules de HCl non ionisées dans l'eau

- Equation-bilan :
 - $HCl \rightarrow H_3O^+ + Cl^-$
 - $2H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + OH^-$
- Dressons l'inventaire des espèces chimiques éventuellement présentes dans l'eau :
 - Molécules : H_2O ; HCl
 - Ions : H_3O^+ ; Cl^- ; OH^-
- Utilisons la valeur du pH

$$pH = 2 \Rightarrow [H_3O^+] = 10^{-2} \text{ mol. L}^{-1}$$

- Produit ionique de l'eau

$$[H_3O^+].[OH^-] = K_e = 10^{-14} \text{ à } 25^\circ C$$

$$\text{Donc } [OH^-] = \frac{K_e}{[H_3O^+]} = \frac{10^{-14}}{10^{-2}} = 10^{-10} \text{ mol. L}^{-1}$$

Comparons $[H_3O^+]$ et $[OH^-]$

$$\frac{[OH^-]}{[H_3O^+]} = \frac{10^{-10}}{10^{-2}} = 10^{-8} < 10^{-4}$$

Donc les ions OH^- sont ultraminoritaires par rapport aux ions H_3O^+

- Electroneutralité de la solution :

$$[H_3O^+] = [Cl^-] + [OH^-] \Rightarrow [Cl^-] = [H_3O^+] - [OH^-]$$

$$\text{Or } [OH^-] \ll [H_3O^+]$$

$$\text{Donc } [Cl^-] = [H_3O^+] = 10^{-2} \text{ mol. L}^{-1}.$$

- La conservation de la matière

$$n_{HCl \text{ introduit}} = n_{Cl^-} + n_{HCl \text{ en solution}}$$

$$C_a = [Cl^-] + [HCl] \text{ équation de conservation de la matière.}$$

$$C_a = 10^{-2} \text{ mol. L}^{-1} \text{ et } [Cl^-] = 10^{-2} \text{ mol. L}^{-1} \Rightarrow [HCl] = 0$$

Conclusion : Dans une solution d'acide chlorhydrique, il n'y a pas de molécule de HCl.

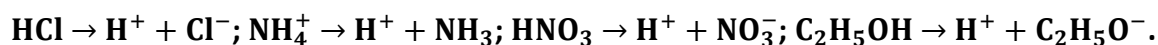
c. pH d'une solution d'acide chlorhydrique et domaine de validité

Soit C_a la concentration d'une solution d'acide chloridrique :

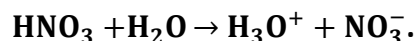
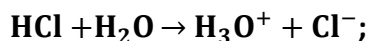
- si $10^{-6} \leq C_a < 10^{-1} \text{ mol. L}^{-1}$: $pH = -\log C_a \Leftrightarrow C_a = 10^{-pH}$
- si $C_a < 10^{-6} \text{ mol. L}^{-1}$: $pH \simeq 7$.

d. Généralisation : les acides forts

- On appelle acide une espèce chimique (molécule ou ion) capable de céder un ion H^+ .
Exemples : HCl, NH_4^+ , HNO_3 , C_2H_5OH ; CH_3COOH .



- Un acide fort est une espèce acide qui donne avec l'eau une réaction totale, on obtient entre autre un ion H_3O^+ . Exemples : HCl , HNO_3 .



Pour un acide est fort : $\text{pH} = -\log C_a \Leftrightarrow C_a = [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}.$

V. Solution d'hydroxyde de sodium

1. Etude qualitative :

a. Mise en solution :

La mise en solution de l'hydroxyde de sodium possède les propriétés suivantes

- L'hydroxyde de sodium est très soluble dans l'eau : à température ordinaire, on peut dissoudre environ 1kg d'hydroxyde de sodium dans 1L d'eau
- La dissolution de l'hydroxyde de sodium dans l'eau est exothermique

b. Caractère ionique :

- La solution d'hydroxyde de sodium conduit le courant électrique ; elle contient donc des ions
- Si nous plaçons la pointe d'un long clou en fer préalablement plongé dans une solution d'hydroxyde de sodium à l'extrémité supérieur du cône bleu de la flamme d'un bec Bunsen. Une flamme jaune orangée apparaît, se superposant à celle du brûleur : la solution d'hydroxyde de sodium contient des ions sodium Na^+
- Une goutte de la solution d'hydroxyde de sodium déposée sur un papier pH le fait virer au violet : la solution d'hydroxyde de sodium contient des ions hydroxydes OH^- :
- L'équation bilan de la réaction s'écrit $\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{OH}^-$

2. Etude quantitative :

a. Calcul de la concentration des espèces en solution :

Etudions une solution d'hydroxyde de sodium de concentration $C_0 = 10^{-2} \text{ mol/L}$ dont le pH est égal à 12.0. On considère qu'il reste à priori des molécules de NaOH non ionisées dans l'eau.

- Equation-bilan
 - $\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{OH}^-$
 - $2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$
- Inventaire des espèces chimiques en solution
 - Molécules : H_2O ; NaOH
 - Ions : H_3O^+ ; OH^- , Na^+
- Utilisons la valeur du pH : $\text{pH} = 12 \Rightarrow [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-12} \text{ mol/L}$
- Produit ionique de l'eau

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_e}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = \frac{10^{-14}}{10^{-12}} = 10^{-2} \text{ mol/L}$$

Comparons $[\text{H}_3\text{O}^+]$ et $[\text{OH}^-]$

$$\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{OH}^-]} = \frac{10^{-12}}{10^{-2}} = 10^{-10} < 10^{-4} :$$

Les ions H_3O^+ sont ultra minoritaires par rapport aux ions OH^-

- Electroneutralité :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] + [\text{Na}^+] = [\text{OH}^-] \Rightarrow [\text{Na}^+] = [\text{OH}^-] + [\text{H}_3\text{O}^+]$$

$$\text{Or } [\text{H}_3\text{O}^+] \ll [\text{OH}^-]$$

Donc $[Na^+] = [OH^-] = 10^{-2} \text{ mol/L}$

- Conservation de la matière :

$$n_{NaOH \text{ introduit}} = n_{Na^+} + n_{NaOH \text{ en solution}}$$

En divisant cette équation par V, il vient :

$$C_0 = [Na^+] + [NaOH]$$

On tire : $[NaOH] = C_0 - [Na^+]$

$$C_0 = 10^{-2} \text{ mol/L et } [Na^+] = 10^{-2} \text{ mol/L} \Rightarrow [NaOH] = 0$$

Conclusion : dans une solution de NaOH ; il n'y a pas de molécule de NaOH .

b. pH d'une solution, d'hydroxyde de sodium

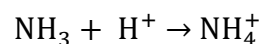
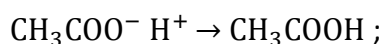
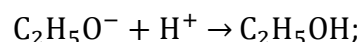
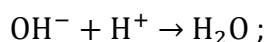
Le pH d'une solution de sodium de concentration C_b est donné par la relation :

- $pH = 14 + \log C_b$ quand $10^{-6} \text{ mol.L}^{-1} \leq C_b \leq 10^{-1} \text{ mol.L}^{-1}$
- $pH \approx 7$ pour $C_b < 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$

c. Généralisation : les bases fortes

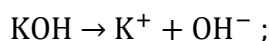
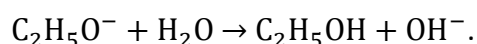
- Définition : une base est une espèce chimique (molécule ou ion) susceptible de capter un proton H^+ .

Exemples : OH^- ; CH_3COO^- ; $C_2H_5O^-$ (éthanolate); NH_3 .



- Une base forte est une espèce base qui réagit avec l'eau selon une réaction totale pour donner entre autre des ions OH^- .

Exemples : NaOH (hydroxyde de sodium) ; KOH (hydroxyde de potassium) ; $C_2H_5O^-$



Expression du pH d'une base forte :

Pour une base forte de concentration C_b : **$pH = 14 + \log C_b$ à $25^\circ C$ et $[OH^-] = C_b$.**

B COUPLE ACIDE-BASE

Classe : 12eme SB et SE

Discipline : Chimie

Objectifs :

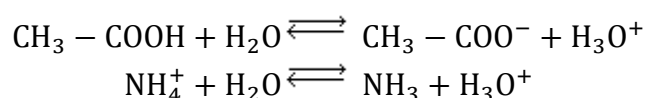
- définir un acide faible, une base faible ;
- définir un couple acide-base ;
- donner les expressions des constantes K_a et pK_a ;
- comparer la force des acides ou des bases ;
- déterminer le domaine de prédominance et la distribution des espèces acido-basiques.

I. Couple acide-base :

1. Acide faible :

Un acide est dit faible en solution aqueuse si sa réaction avec l'eau est limitée.

Exemple :



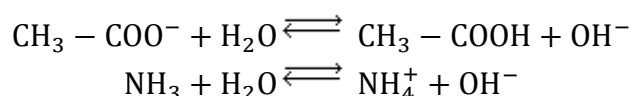
Pour une solution d'acide faible de concentration C_A , $[\text{H}_3\text{O}^+] < C_A$ et $\text{pH} > -\log C_A$.

La dilution favorise la dissociation d'un acide faible, la quantité de matière de H_3O^+ croît.

2. Base faible :

Une base est dite faible en solution aqueuse si sa réaction avec l'eau est limitée.

Exemple :

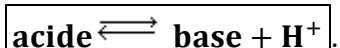


Pour une solution de base faible de concentration C_B , $[\text{OH}^-] < C_B$ et à 25°C ; $\text{pH} < 14 + \log C_B$.

La dilution favorise la dissociation d'une base faible, la quantité de matière de OH^- croît.

3. Couple acide-base :

Deux espèces acide et base forment un couple acide/base si elles sont reliées par le schéma formel suivant :



Les deux espèces sont dites conjuguées. Il y a coexistence de l'acide et de la base conjuguée en équilibre chimique.

Un couple acide base est noté « **acide/base** ».

Exemples : $\text{CH}_3 - \text{COOH}/\text{CH}_3 - \text{COO}^-$; $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$.

Espèce amphotère :

Toute espèce qui est l'acide d'un couple et la base d'un autre couple est dite amphotère.

Exemple :

L'eau est la base du couple $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O}$; $\text{H}_3\text{O}^+ \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$.

L'eau est l'acide du couple $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}^-$; $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{OH}^- + \text{H}^+$.

L'eau est espèce amphotère.

II. Constante d'acidité :

Pour un couple A/B ; il existe un nombre K_A sans dimension qui ne dépend que de la température appelé constante d'acidité du couple A/B dans l'eau.

$$K_A = \frac{[H_3O^+] \times [B]}{[A]}$$

On introduit une autre constante notée pK_A liée à la constante d'acidité K_A par la relation :

$$pK_A = -\log K_A.$$

D'où la relation :

$$pH = pK_A + \log \frac{[B]}{[A]}.$$

III. Classification des couples acide/base :

1. Force des acides :

- ❖ A concentrations égales l'acide le plus fort est celui pour lequel le pH est le plus faible.
- ❖ Un acide est d'autant plus fort que sa constante d'acidité K_A est plus grande ou que son pK_A est plus petit.

2. Force des bases :

- ❖ A concentrations égales, la base la plus forte est celle dont la solution a le pH le plus élevé.
- ❖ Une base est d'autant plus forte que la constante d'acidité K_A associée au couple acide/base auquel elle appartient est plus petite ou que le pK_A correspondant est plus grand.

3. Coefficient de dissociation :

- ❖ Le coefficient de dissociation d'un acide de concentration C_A dans l'eau est le rapport : $\alpha = \frac{[B]}{C_A}$, où $[B]$ est la concentration molaire de la base conjuguée.
- ❖ Le coefficient de dissociation d'une base de concentration C_B dans l'eau est le rapport : $\alpha = \frac{[A]}{C_B}$, où $[A]$ est la concentration molaire de l'acide conjugué.
- ❖ A concentrations égales, l'acide le plus fort a le coefficient le plus élevé.
- ❖ A concentrations égales, la base la plus forte a le coefficient le plus élevé.

Pour un acide fort ou une base forte $\alpha = 1$.

Pour un acide faible ou une base faible $0 < \alpha < 1$.

IV. Domaine de prédominance et distribution des espèces acido-basiques.

1. Définition :

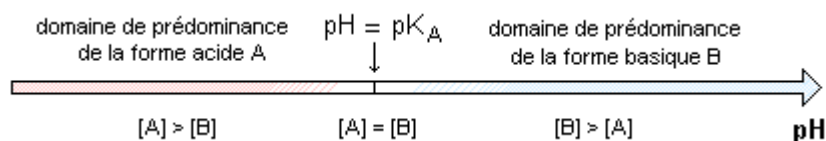
Une espèce A est prédominante par rapport à une espèce B si : $[A] > [B]$.

2. Domaine de prédominance :

D'après la relation : $pH = pK_A + \log \frac{[B]}{[A]} \Rightarrow \log \frac{[B]}{[A]} = pH - pK_A$.

- ❖ A prédomine par rapport à B donc $[A] > [B]$
 $[B]/[A] < 1 \Rightarrow \log([B]/[A]) < 0 \Rightarrow pH - pK_A < 0 \Rightarrow pH < pK_A$.
- ❖ B prédomine par rapport à A donc $[A] < [B]$
 $[B]/[A] > 1 \Rightarrow \log([B]/[A]) > 0 \Rightarrow pH - pK_A > 0 \Rightarrow pH > pK_A$.
- ❖ A et B sont en concentrations égales donc $[A] = [B]$
 $[B]/[A] = 1 \Rightarrow \log([B]/[A]) = 0 \Rightarrow pH - pK_A = 0 \Rightarrow pH = pK_A$.

On résume, en général, ces situations sur le diagramme de prédominance donné ci-dessous:



3. Application aux indicateurs colorés.

Un indicateur coloré est un couple acide/base conjuguée (on le notera: InH / In^-), dont la forme acide InH et la forme basique In^- ont des couleurs différentes en solution.

On admet que la solution dans laquelle se trouve l'indicateur a la couleur de la forme acide InH si: $[\text{InH}] > 10[\text{In}^-]$. Soit K_A la constante d'acidité associée à ce couple. La solution aura la couleur de la forme acide si: $[\text{InH}] > 10[\text{In}^-] \Rightarrow [\text{InH}] / [\text{In}^-] > 10 \Rightarrow \text{pH} < \text{p}K_A - 1$

De la même façon la solution dans laquelle se trouve l'indicateur a la couleur de la forme basique si: $[\text{In}^-] > 10[\text{InH}] \Rightarrow [\text{In}^-] / [\text{InH}] > 10 \Rightarrow \text{pH} > \text{p}K_A + 1$

La solution prendra une couleur appelée teinte sensible (mélange des couleurs dues à la forme acide et à la forme basique) si: $[\text{InH}]$ et $[\text{In}^-]$ sont du même ordre de grandeur, donc si: $\text{p}K_A - 1 < \text{pH} < \text{p}K_A + 1$.

4. Réaction entre un acide et une base :

Si on considère deux couples A_1/B_1 et A_2/B_2 de constantes d'acidité très différentes ($|\text{p}K_{a1} - \text{p}K_{a2}| > 4$) :

- l'acide le plus fort réagit presque totalement sur la base la plus forte ;
- l'acide le plus faible ne réagit presque pas sur la base la plus faible.

5. Cas des acides forts et base fortes dans l'eau :

Une solution d'acide fort, ne contient comme espèce acide que l'ion H_3O^+ , en plus de H_2O . La base conjuguée B de l'acide A n'a aucune activité acido-basique. On ne peut pas définir la constante K_a pour un acide fort. Tous les acides forts sont équivalents dans l'eau.

De même toutes les bases fortes sont équivalentes dans l'eau. On dit que l'eau a un effet nivelant. On ne peut pas classer les acides forts et les bases fortes.

C RÉACTIONS ACIDE-BASE : SOLUTION TAMPON

Classe : 12eme SB et SE

Discipline : Chimie

Objectifs: L'élève doit capable de :

- écrire les équations bilan des réactions acide fort base forte, acide fort base faible ;
- calculer le pH en fonction de la variation de volume d'acide ou de base ;
- tracer la courbe de variation du pH en fonction du volume d'acide ou de base versé et dire l'importance des zones d'équivalence ;
- calculer la concentration inconnue à partir de la relation d'équivalence ;
- identifier sur la courbe la zone la zone de réaction acide base et déduire le point d'équivalence ;
- définir une solution tampon et donner ses propriétés ;
- donner un exemple de solution biologique qui possède de propriétés tampon.

I. Réaction acide fort base forte :**Doser une solution d'acide ou de base, c'est déterminer sa concentration.**

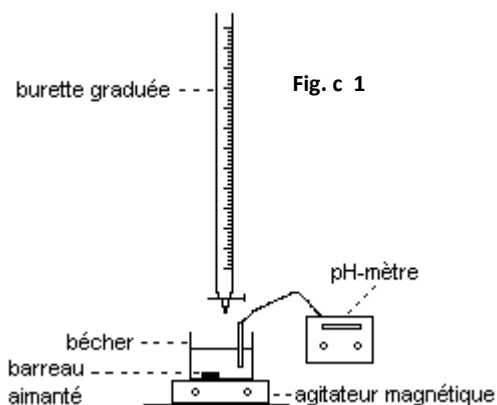
Étude de la variation de pH : Action de la soude (hydroxyde de sodium) sur l'acide chlorhydrique

1. Expérience : Le montage est le suivant :

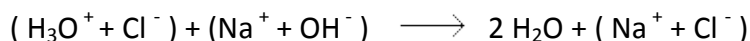
Le bécher contient $V_a = 20 \text{ cm}^3$ d'acide chlorhydrique de concentration $C_a = 0,01 \text{ mol/L}$ (volume V_a mesuré avec une pipette jaugée).

La burette graduée contient de la soude de concentration $C_b = 0,01 \text{ mol/L}$.

Un pH-mètre, préalablement étalonné, permet de suivre le pH de la solution après chaque ajout d'hydroxyde de sodium.

**2. L'équation-bilan de la réaction s'écrit :**

On peut aussi écrire :



Les ions Na^+ et Cl^- étant passifs (spectateurs) sont généralement supprimés.

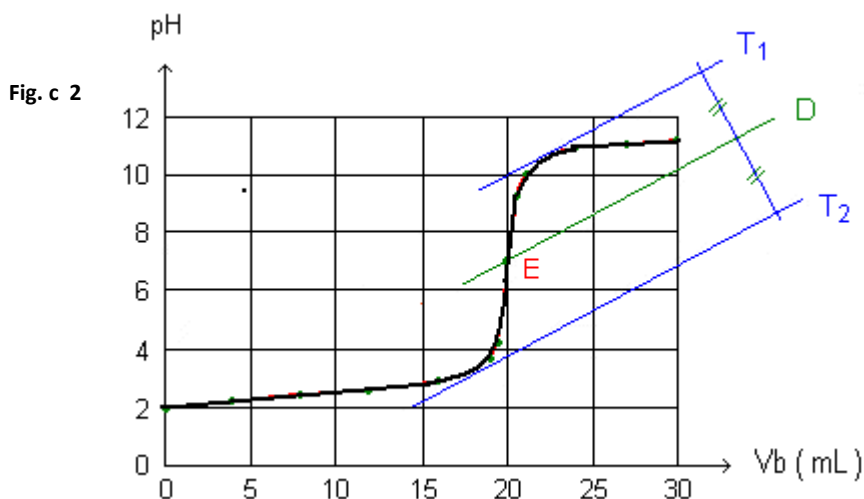
Il serait faux d'écrire : $\text{HCl} + \text{NaOH} \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ car trois de ces composés sont ioniques en milieu aqueux.

3. Mesures. Tracé du graphe $\text{pH} = f(V_b)$

On verse progressivement la soude et, après chaque ajout, on mesure le pH. On a obtenu les résultats suivants :

$V_b \text{ (ml)}$	0	4	8	12	16	19	19,5	20	20,5	21	24	27	30
pH	2	2,2	2,4	2,6	2,9	3,6	4,2	7	9,3	10	10,9	11	11,2

Reportons ces résultats sur un graphe :



Méthode des tangentes parallèles pour la détermination du point d'équivalence E :

Les droites T_1 et T_2 , parallèles, sont tangentes à la courbe.

La **droite D** est équidistante de T_1 et T_2 .

Le point d'équivalence **E** est le point d'intersection de la courbe et de la droite D.

Etude de la courbe :

La courbe présente un seul point d'inflexion **E** avec 3 parties distinctes :

1° partie - Pour V_b variant de 0 à 16 mL, le pH varie peu (voir la courbe).

Lorsque $V_b = 0$ mL, on a seulement l'acide fort avec :

$$pH_{\text{initial}} = -\log C_a = -\log 10^{-2} = 2.$$

Lorsque V_b croît le réactif limitant reste OH^- , le réactif en excès H_3O^+ impose un $pH < 7$.

2° partie - Pour V_b variant de 16 à 24 mL, on observe un saut de pH important autour du point d'inflexion **E**, en lequel la courbe change de concavité (voir la courbe).

Définition : A l'équivalence les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques de la réaction de dosage : $n(a)_{\text{initial}} = n(b)_{\text{ajouté à l'équivalence}}$

$$\text{Soit : } n_a = C_a V_a = C_b V_{bE} = n_{bE}$$

La relation : $C_a \cdot V_a = C_b \cdot V_{bE}$ est appelée relation d'équivalence.

A l'équivalence $(pH)_E = 7$ car les ions H_3O^+ et OH^- , introduits en quantité égale, réagissent mole à mole pour donner de l'eau. On a toujours $(pH)_E = 7$, à l'équivalence, lorsqu'on dose un monoacide fort par une monobase forte. Ce n'est plus le cas si l'un des réactifs est faible alors que l'autre est fort.

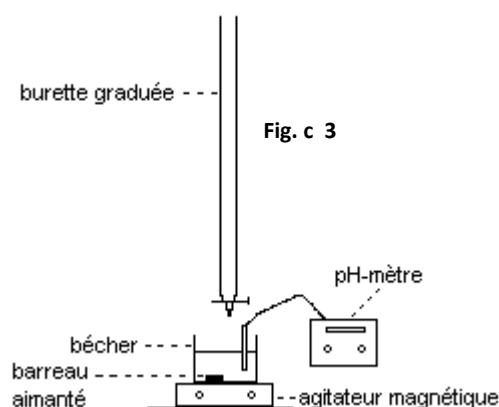
3° partie - Pour V_b supérieur à 24 mL, le pH augmente lentement vers la valeur $pH = 12$ (correspondant au pH de la solution de soude ajoutée soit $pH = 14 + \log C_b$) (voir la courbe).

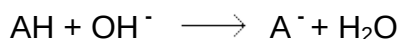
Le réactif limitant est H_3O^+ , le réactif en excès est OH^- . Le milieu est de plus en plus basique.

II. Réaction acide faible et base forte :

1. **Expérience** : La solution d'acide faible à doser est mise dans le bécher. La solution de base forte est dans la burette graduée. Un pH-mètre, étalonné, permet de mesurer le pH après chaque ajout de soude.

2. Réaction d'un acide faible avec une base forte :





La réaction entre un acide faible et une base forte est totale. La base forte est représentée par H_3O^+ :

- L'équation de la réaction de dosage montre, qu'à l'équivalence, la quantité de matière d'ions OH^- ajoutés est égale à la quantité de matière d'acide initial. On écrit :

$$n_{\text{acide initial}} = n_{\text{soude ajoutée à l'équivalence E}} \Leftrightarrow C_a \cdot V_a = C_b \cdot V_{bE}$$

- A l'équivalence, le milieu contient surtout A^- , Na^+ et H_2O . Par conséquent le pH est basique car l'ion A^- est une base faible : $\text{pH}_E > 7$
(Voir les différences avec le cas du dosage d'un acide fort par une base forte).

3. Demi-équivalence :

A la demi équivalence ($V_{b \text{ demi-équivalence}} = \frac{1}{2} V_{b \text{ équivalence}}$) on montre que : $\text{pK}_a = \text{pH}$

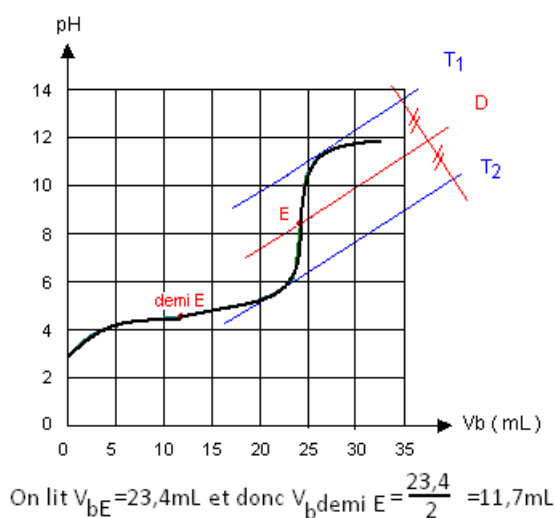
Cette relation est vraie à condition que l'acide soit faible et que les solutions ne soient pas trop diluées.

4. ETUDE DE LA COURBE $\text{pH} = f(V_b)$

Bien noter les différences avec le cas du dosage d'un acide fort par une base forte

Ici, dans le cas du dosage d'un acide faible par une base forte, la courbe présente généralement 2 points d'inflexion :

- Le point d'équivalence E en lequel on a $C_a \cdot V_a = C_b \cdot V_{bE}$ et $\text{pH}_E > 7$.
- Le point de demi-équivalence, noté demi-E, en lequel on a $\text{pK}_a = \text{pH}_{\text{demi-équivalence}}$.



Remarque : On utilise la méthode des tangentes parallèles pour la détermination du point d'équivalence E :

Les droites parallèles T_1 et T_2 sont deux tangentes à la courbe, situées au début et à la fin du saut de pH.

La droite D est équidistante de T_1 et T_2 .

Le point d'équivalence E est le point d'intersection de la courbe et de la droite D.

5. Choix d'un indicateur coloré :

Si, au lieu de faire un dosage pH métrique, on se contente de faire un dosage colorimétrique, alors il faut choisir un **indicateur coloré** dont la zone de virage englobe le pH à l'équivalence. Son changement de couleur indiquera que l'on a atteint ce point d'équivalence.

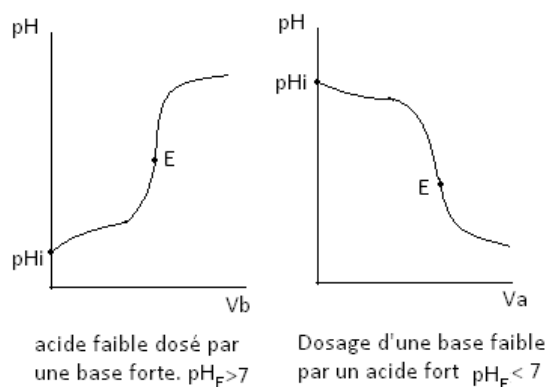
Ici, on dose un acide faible par une base forte : $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{OH}^- \longrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O}$

Le pH à l'équivalence est donc légèrement basique (l'ion CH_3COO^- formé est une base faible).

En général la phénolphthaléine convient (zone de virage entre 8 et 10). Afin de ne pas perturber les mesures on n'utilise que quelques gouttes d'indicateur.

Remarque :

L'allure générale de la courbe de titrage dépend de la nature de la solution à titrer (placée dans le bécher). S'il s'agit d'une solution acide, le pH initial est inférieur à 7 (courbe (1) ci-dessous). S'il s'agit d'une solution basique, le pH initial est supérieur à 7 (courbe (2) ci-dessous).

III. SOLUTION TAMPON**1. Définition :**

Une solution tampon renferme un acide faible et sa base conjuguée en concentrations égales ou voisines.

On sait que $pH = pKa + \log \left[\frac{Base}{Acide} \right]$

Si $[Base] = [Acide]$ alors $pH = pKa$.

Si $[Base]$ est voisin de $[Acide]$ alors pH est voisin de pKa .

Une solution tampon possède un pH égal ou voisin du pKa du couple ayant servi à la préparer.

2. Propriétés d'une solution tampon :

Le pH d'une solution tampon évolue peu :

- par addition en quantité modérée d'acide
- par addition en quantité modérée de base
- par dilution limitée.

3. Importance de l'effet tampon :

Les mélanges tampon jouent un rôle très important dans l'ensemble de la chimie. Certaines réactions ne peuvent se faire que dans un milieu tampon.

Les solutions tampons jouent aussi un rôle fondamental dans les systèmes chimiques vivants. Le pH ne peut varier, dans chaque organe, qu'entre des limites très étroites, sous peine de troubles importants.

4. Applications :

Les solutions tampons ont de très nombreuses applications :

- régulation du pH des milieux biologiques (sang, liquide intracellulaire...).
- formulation tamponnée des médicaments, des produits cosmétiques,....
- étalonnage des pH-mètres.

Remarque : Le point d'équivalence E peut être déterminé graphiquement de 2 façons : par la méthode des tangentes parallèles (voir la fin du paragraphe 2-3 ci-dessus) ou par la méthode utilisant la courbe dérivée dpH / dVb qui passe par un maximum au point E (la pente de la courbe est maximale au point E).