

ANNEE ACADEMIQUE : 2019-2020



REPUBLIQUE DU SENEGAL

Un Peuple--Un But--Une Foi

ACADEMIE DE KAOLACK

LYCEE MIXTE NGANE SAER

LYCEE VALDIODIO NDIAYE

FASCICULE COMPLEMENT

COURS SCIENCES PHYSIQUES

TERMINALE S2

*Réalisé par le lycée Mixte de Ngane
Saer et le lycée Valdiodio Ndiaye
Kaolack commune
Tel : 77 418 04 50/776616741
E-mail : omaniass81@yahoo.fr*

PARTIE CHIMIE

C 07 : ACIDES ET BASES FAIBLES – COUPLES ACIDE/BASE – CONSTANTE D'ACIDITE ET CLASSIFICATION DES COUPLES ACIDE/BASE.

Introduction :

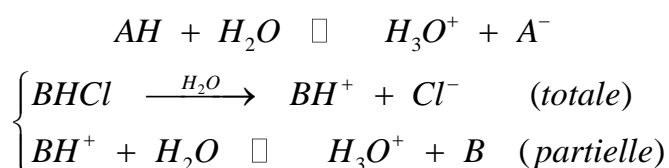
Les acides colorent en jaune le BBT tandis que les bases colorent en bleu le BBT. Si leur dissociation dans l'eau est une réaction limitée, on parle d'acide et base faible.

I. Acide faible

I.1.1. Etude quantitative

I-1. Définition

Un acide faible (AH ou BH^+) est une espèce chimique qui se dissocie partiellement dans l'eau en libérant des ions hydronium H_3O^+ selon l'équation :



Exemples :

- * Acides carboxyliques : $RCOOH + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + RCOO^-$
- * Acide fluorhydrique : $HF + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + F^-$
- * Ions alkyl ammonium : $R-NH_3^+ + H_2O \rightleftharpoons R-NH_2 + H_3O^+$

I.2 EXEMPLE :

A 25°C une solution d'acide éthanoïque de concentration molaire 10^{-2} mol/L a un pH = 3,4.

Montrer que l'acide acétique n'est pas un acide fort,

Faire l'inventaire des différentes espèces chimiques en solution puis calculer leurs concentrations. Conclure.

Calculer le coefficient (ou degrés) d'ionisation α_1 de cette solution,

On dilue 10 fois un certain volume de la solution précédente, la solution obtenue a un pH = 3,9.

Calculer le nouveau coefficient d'ionisation α_2 . Conclure.

Solution

Toutes les molécules d'acide éthanoïque ne sont pas dissociées.

✓ **Conclusion**

L'ionisation des molécules d'acide éthanoïque dans l'eau est partielle : on dit que la solution d'acide éthanoïque est un acide faible.

Degrés (ou coefficient) d'ionisation

Par définition, le coefficient d'ionisation (ou de dissociation) est le rapport entre le nombre de moles de molécules dissociées (réagit) et le nombre de moles de molécules initiales.

$$\alpha = \frac{\text{Nombre de moles de molécules dissociées}}{\text{Nombre de moles de molécules initiales}}$$

Dans cet exemple : $\alpha_1 = \frac{n(CH_3-COO^-)}{n(CH_3-COOH)_{init}} = \frac{[CH_3-COO^-]}{[CH_3-COOH]_{init}} = \frac{[CH_3-COO^-]}{C}$

$$\alpha_1 = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{10^{-2}} = 0,04 \quad \text{soit } 4\% \quad \left| \quad \text{Sur } 100 \text{ molécules mises en solution, seules } 4 \text{ se sont dissociées.} \right.$$

Degrés (ou coefficient) d'ionisation de la solution diluée

Si on dilue 10 fois, la concentration de la nouvelle solution est : $C' = \frac{C}{10} = \frac{10^{-2}}{10} = 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$

D'après l'électroneutralité : $[CH_3 - COO^-] = [H_3O^+] = 10^{-pH} = 10^{-3,9} = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$

Le degrés d'ionisation est : $\alpha_2 = \frac{[CH_3 - COO^-]}{C'} = \frac{1,26 \cdot 10^{-4}}{10^{-3}} = 0,126 \quad \text{soit } 12,6\%$

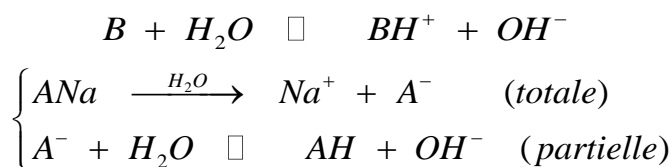
Conclusion

On constate que $\alpha_2 > \alpha_1$. Le coefficient d'ionisation augmente avec la dilution.

II. Base faible

II-1. Définition

Une base faible (B ou A^-) est une espèce chimique qui se dissocie partiellement dans l'eau en libérant des ions hydroxyde OH^- selon l'équation :



Exemples :

- * Ammoniac : $NH_3 + H_2O \rightleftharpoons OH^- + NH_4^+$
- * Les amines : $R-NH_2 + H_2O \rightleftharpoons OH^- + R-NH_3^+$
- * Carboxylate de sodium : $R-COO^- + H_2O \rightleftharpoons OH^- + R-COOH$

II.2 EXEMPLE :

Une solution d'éthanoate de sodium de concentration molaire 10^{-2} mol/L a un $pH = 8,4$ à 25°C .

Ecrire les équations traduisant l'interaction des solides ioniques avec l'eau

Montrer que la solution obtenue n'est pas une base forte,

Faire l'inventaire des différentes espèces chimiques en solution puis calculer leurs concentrations.

Conclure.

En déduire le coefficient (ou degrés) d'ionisation α de l'ion éthanoate.

Solution

Sur 10000 ions d'éthanoate, seuls 2,5 réagissent avec l'eau.

III. Couple acide/base

III.1. Acide et base selon Bronsted

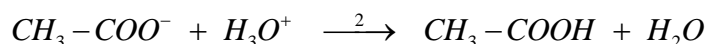
Un acide est une substance chimique (molécule ou ion) capable de libérer un ou plusieurs protons (H^+).

Une base est une substance chimique (molécule ou ion) capable de capter un ou plusieurs protons (H^+).

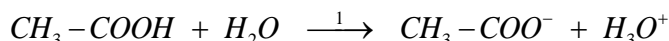
III.2. Notion de couple acide/base

III.2-1. Couple acide éthanoïque/ion éthanoate

Si on verse dans une solution d'éthanoate de sodium une solution d'acide chlorhydrique, la quasi-totalité des ions éthanoates réagissent avec les ions H_3O^+ par la réaction :



Cette réaction (2) est la réaction inverse de la réaction d'ionisation de l'acide éthanoïque dans l'eau.



Ces deux réactions mènent à un équilibre chimique qui se traduit par l'équation suivante :



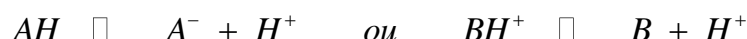
On dit qu'à l'acide $\text{CH}_3\text{-COOH}$ correspond la base $\text{CH}_3\text{-COO}^-$ et vice versa : elles constituent un couple acide/base noté $\text{CH}_3\text{-COOH}/\text{CH}_3\text{-COO}^-$.

✓ $\text{CH}_3\text{-COO}^-$ est la base conjuguée de $\text{CH}_3\text{-COOH}$

✓ $\text{CH}_3\text{-COOH}$ est l'acide conjugué de $\text{CH}_3\text{-COO}^-$

III.2-2. Généralisation

A tout acide AH (ou BH^+) correspond une base A^- (ou B) tel que :



Les espèces AH (ou BH^+) et A^- (ou B) constituent un couple acide/base noté : AH/A^- ou BH^+/B .

Définition :

Un couple acide/base est constitué par deux espèces conjuguées qui échangent un proton selon le schéma : $\text{Acide} \rightleftharpoons \text{Base} + \text{H}^+$

Exemple :

- * Couple $\text{C}_6\text{H}_5\text{-CO}_2\text{H}/\text{C}_6\text{H}_5\text{-CO}_2^-$: $\text{C}_6\text{H}_5\text{-CO}_2\text{H} \rightleftharpoons \text{C}_6\text{H}_5\text{-CO}_2^- + \text{H}^+$
- * Couple $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$: $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$
- * Couple HCl/Cl^- : $\text{HCl} \rightleftharpoons \text{Cl}^- + \text{H}^+$
- * Couple $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}/\text{C}_2\text{H}_5\text{O}^-$: $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_5\text{O}^- + \text{H}^+$

Remarque :

Toute réaction acido-basique s'effectue entre couples acide/base (A_1/B_1 et A_2/B_2) avec transfert de protons de l'un des acides vers l'autre base selon le schéma :

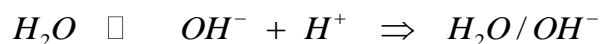


III.2-3. Les couples de l'eau

L'ion hydronium est susceptible de céder un proton à l'eau selon l'équation :



L'eau est susceptible de céder un proton à l'ion hydroxyde OH^- selon l'équation :




L'eau est à la fois un acide faible et une base faible : on dit que l'eau est un amphotère ou qu'elle est un ampholyte.

III.2-4. Cas des polyacides et des polybases

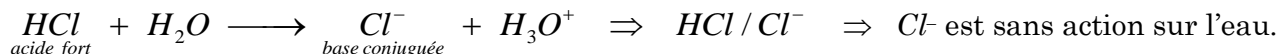
- * Couple $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HSO}_4^-$: $\text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{HSO}_4^- + \text{H}^+$
- * Couple $\text{HSO}_4^-/\text{SO}_4^{2-}$: $\text{HSO}_4^- \longrightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+$

L'ion HSO_4^- présente un double caractère acide ou basique : c'est un ampholyte (ou amphotère).

III.2-5. Cas des acides forts et des bases fortes

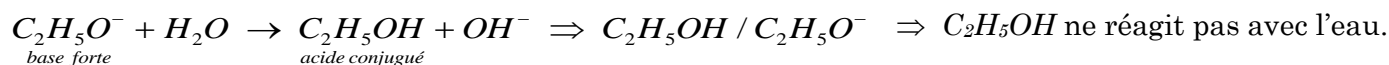
 La base conjuguée d'un acide fort est sans action dans l'eau : on dit qu'elle est indifférente.

Exemple : L'acide chlorhydrique HCl



☞ L'acide conjugué d'une base forte est indifférent.

Exemple : L'ion éthanolate $C_2H_5O^-$



IV. Constante d'acidité – Classification des couples acide/base

IV.1. Définition et formule

Considérons l'équilibre chimique du couple acide/base faible AH/A^- : $AH + H_2O \rightleftharpoons A^- + H_3O^+$

La constante d'équilibre relative aux concentrations est définie par :

$$K = \frac{[A^-] \cdot [H_3O^+]}{[AH] \cdot [H_2O]} = cste$$

Or, $[H_2O] = cste \Rightarrow K \cdot [H_2O] = cste = K_r$, K_r est appelée constante de réaction réduite ou constante d'acidité notée K_a .

$$K_a = \frac{[A^-] \cdot [H_3O^+]}{[AH]} = \frac{[base] \cdot [H_3O^+]}{[acide]} = cste$$

On définit le pK_a : $pK_a = -\log K_a \Rightarrow K_a = 10^{-pK_a}$

Exemple :

* Couple $CH_3-CO_2H / CH_3-CO_2^-$: $CH_3-CO_2H + H_2O \rightleftharpoons CH_3-CO_2^- + H_3O^+$

$$K_a = \frac{[CH_3-CO_2^-] \cdot [H_3O^+]}{[CH_3-CO_2H]} = cste. \quad \text{A } 25^\circ\text{C, } K_a = 1,6 \cdot 10^{-5} \Rightarrow pK_a = 4,8.$$

* Couple NH_4^+ / NH_3 : $NH_4^+ + H_2O \rightleftharpoons NH_3 + H_3O^+$

$$K_a = \frac{[NH_3] \cdot [H_3O^+]}{[NH_4^+]} = cste. \quad \text{A } 25^\circ\text{C, } K_a = 6,3 \cdot 10^{-10} \Rightarrow pK_a = 9,2.$$

Remarque :

☞ Le K_a et le pK_a ne dépendent que de la température.

☞ Par analogie, un couple acide/base peut être caractérisé par sa constante de basicité K_b :

$$A^- + H_2O \rightleftharpoons AH + OH^- \Rightarrow K_b = \frac{[AH] \cdot [OH^-]}{[A^-]} = \frac{[acide] \cdot [H_3O^+]}{[base]} = cste$$

☞ On a : $K_a \cdot K_b = \frac{[A^-] \cdot [H_3O^+]}{[AH]} \times \frac{[AH] \cdot [OH^-]}{[A^-]} = [H_3O^+] \times [OH^-] \Rightarrow \underline{K_a \cdot K_b = K_e}$

IV.2. Relation entre pH et pK_a - Domaine de prédominance

IV.2.1. Relation entre pH et pK_a

$$\text{On a } K_a = \frac{[A^-] \cdot [H_3O^+]}{[AH]} \Rightarrow pK_a = -\log K_a = -\log \frac{[A^-] \cdot [H_3O^+]}{[AH]} = -\log [H_3O^+] - \log \frac{[A^-]}{[AH]}$$

$$\text{Or } -\log[H_3O^+] = pH \Rightarrow pKa = pH - \log \frac{[A^-]}{[AH]}$$

$$\text{D'où } pH = pKa + \log \frac{[A^-]}{[AH]} = pKa + \log \frac{[base]}{[acide]}$$

Remarque :

La courbe $pH = f(\log \frac{[A^-]}{[AH]})$ est une droite affine de pente $p=1$ et d'ordonnée à l'origine $b = pKa(AH/A^-)$.

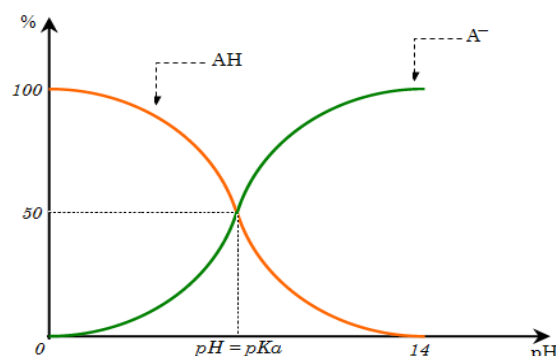
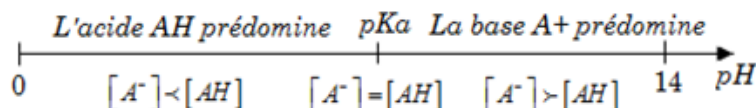
Evaluation 01 : Exercice 04 fascicule**IV.2.2. Domaine de prédominance****Cas général : diagramme de prédominance**

$$\text{On a } pH = pKa + \log \frac{[A^-]}{[AH]} \Rightarrow \log \frac{[A^-]}{[AH]} = pH - pKa$$

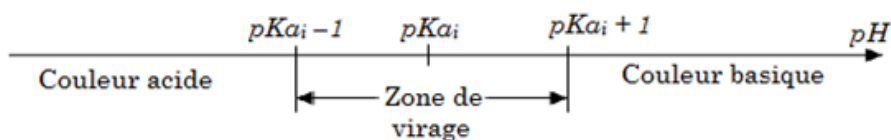
* Si $pH = pKa \Rightarrow \log \frac{[A^-]}{[AH]} = 0 \Rightarrow \frac{[A^-]}{[AH]} = 1 \Rightarrow [A^-] = [AH]$: la solution considérée est dite solution tampon efficace.

* Si $pH > pKa \Rightarrow \frac{[A^-]}{[AH]} > 1 \Rightarrow [A^-] > [AH]$: la forme basique A^- prédomine.

* Si $pH < pKa \Rightarrow \frac{[A^-]}{[AH]} < 1 \Rightarrow [A^-] < [AH]$
: la forme acide AH prédomine.

**Cas des indicateurs colorés**

Un indicateur coloré est un acide faible noté $HInd$ ou une base faible notée Ind^- dont les formes conjuguées ont des couleurs différentes.

**IV.3. Classification des couples acide / base****IV.3.1. Force d'un acide faible ou d'une base faible****Comparaison de deux acides**

* **Avec le Ka ou pKa**

Un acide est d'autant plus fort si le Ka de son couple acide/base est élevé donc le pKa est faible.

* **Avec le pH**

Entre deux acides de même concentration, le plus fort est celui qui a le pH le plus petit.

* **Avec le coefficient de d'ionisation α :**

Un acide est d'autant plus fort si son coefficient de d'ionisation α est élevé.

👉 Comparaison de deux bases

* Avec le K_a ou pK_a

Une base est d'autant plus forte si le K_a de son couple acide/base est faible donc le pK_a est élevé.

* Avec le pH

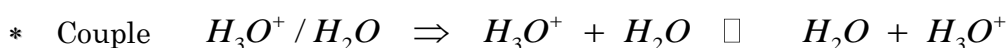
Entre deux bases de même concentration, la plus forte est celle qui a le pH le plus élevé.

Remarque :

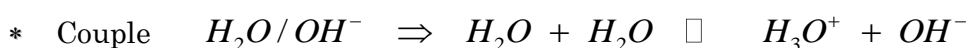
Plus un acide est fort, plus sa base conjuguée est faible et inversement.

IV.3.2. Classification

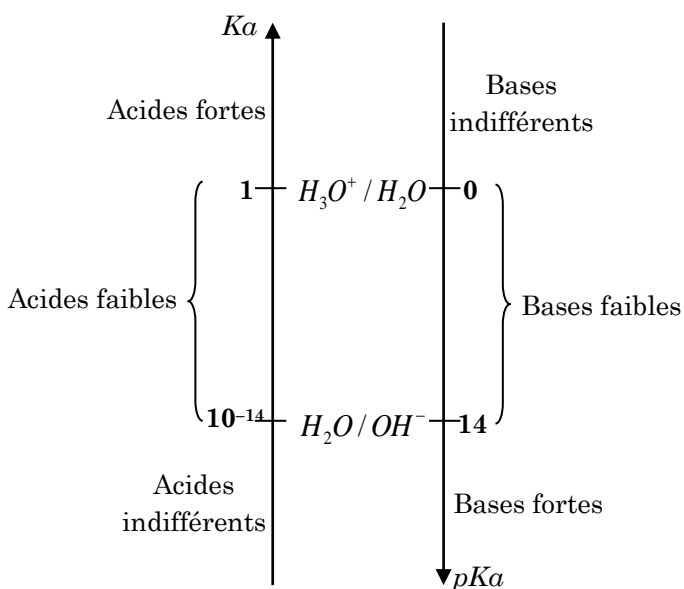
On peut classer les couples acide/base selon les valeurs de K_a et de pK_a .



$$K_{a1} = \frac{[H_3O^+]}{[H_3O^+]} = 1 \Rightarrow pK_{a1} = 0$$



$$K_{a2} = [H_3O^+] \cdot [OH^-] = K_e = 10^{-14} \text{ à } 25^\circ C \Rightarrow pK_{a2} = pK_e = 14$$



En solution aqueuse tout acide faible est plus fort que l'eau H_2O et plus faible que l'ion hydronium H_3O^+ . L'ion H_3O^+ est l'acide le plus fort en solution aqueuse, les autres acides forts (comme HCl) réagissent totalement avec l'eau en donnant des ions H_3O^+ et des bases indifférentes (comme Cl^-).

En solution aqueuse toute base faible est plus forte que l'eau H_2O et plus faible que l'ion hydroxyde OH^- . L'ion OH^- est la base la plus forte en solution aqueuse, les autres bases fortes (comme $C_2H_5O^-$) réagissent totalement avec l'eau en donnant des ions OH^- et des acides indifférents (comme C_2H_5OH).

IV.4. Prédiction des sens d'évolution d'une réaction acido-basique

Considérons la réaction entre un acide A_1 du couple A_1/B_1 et une base B_2 du couple A_2/B_2 de constante d'acidité respective K_{a1} et K_{a2} : $A_1 + B_2 \quad \square \quad B_1 + A_2$

La constante de réaction est :

$$K_r = \frac{[A_2] \cdot [B_1]}{[A_1] \cdot [B_2]} = \frac{[A_2]}{[B_2] \cdot [H_3O^+]} \cdot \frac{[B_1] \cdot [H_3O^+]}{[A_1]} = \frac{K_{a1}}{K_{a2}}$$

$$\Rightarrow K_r = \frac{K_{a1}}{K_{a2}} = \frac{10^{-pK_{a1}}}{10^{-pK_{a2}}} = 10^{pK_{a2} - pK_{a1}}$$

👉 La transformation est favorisée dans le sens 1 (de la gauche vers la droite) si $K_r > 1$; elle est favorisée dans le sens inverse (de la droite vers la gauche) si $K_r < 1$.

👉 Si $K_r > 10^3 \Rightarrow \Delta pK_a > 3$, la réaction est totale : on dit qu'elle est quantitative

C OS : REACTION ACIDE FAIBLE – BASE FORTE ET VICE VERSA – EFFET TAMPON.

Introduction :

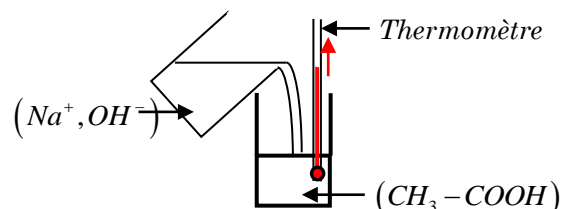
Pour doser une solution d'acide faible, on utilise souvent une solution de base forte. Pour doser une solution de base faible, on utilise souvent une solution d'acide fort.

Les deux types de dosages sont particuliers, la courbe de pH présente un palier où la valeur de pH ne varie presque pas : c'est l'effet tampon.

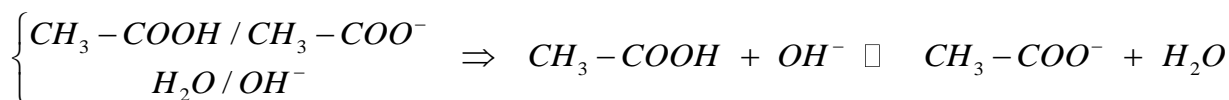
I. Réaction entre un acide faible et une base forte

I.1. Exemple de la réaction entre l'acide éthanoïque et la soude

Si on mélange une solution d'acide éthanoïque de concentration C_a et une solution d'hydroxyde de sodium de concentration C_b , la température s'élève : la réaction est exothermique.



Les couples acide/base mises en jeu sont :



La constante de réaction est :

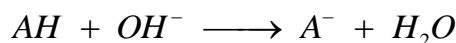
$$K = \frac{[CH_3-COO^-]}{[CH_3-COOH] \cdot [OH^-]} = \frac{[CH_3-COO^-] \cdot [H_3O^+]}{[CH_3-COOH]} \cdot \frac{1}{[H_3O^+] \cdot [OH^-]} = \frac{K_{a1}}{K_{a2}} = 10^{pK_{a2} - pK_{a1}}$$

AN : $K = 10^{14-4,8} = 10^{9,2} \gg 10^3$: la réaction entre l'acide éthanoïque et la soude est totale.

L'équation-bilan est : $CH_3-COOH + OH^- \longrightarrow CH_3-COO^- + H_2O$

I.2. Généralisation

La réaction entre un acide faible AH et une base forte est une réaction totale exothermique d'équation :



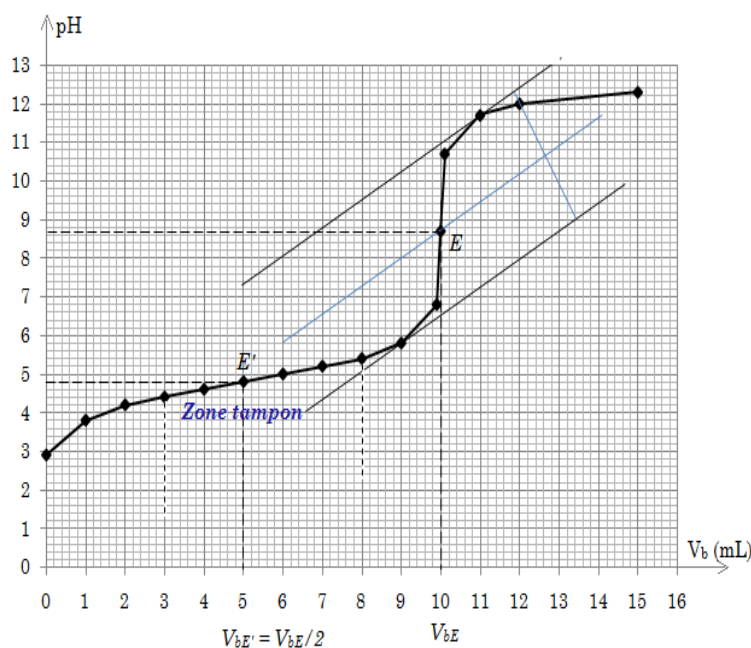
I.3. Dosage d'un acide fort par une base faible : acide éthanoïque par la soude

1.2.1. Mode opératoire

Dans un bécher contenant 10mL d'une solution d'acide éthanoïque, versons progressivement à l'aide d'une burette contenant une solution décimolaire d'hydroxyde de sodium. Pour chaque volume V_b solution de soude versée, on agite puis on relève le pH à l'aide d'un pH-mètre.

1.2.2. Evolution du pH

V_b (mL)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9,9	10	10,1	11	12	15
pH	2,9	3,8	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,8	6,8	8,7	10,7	11,7	12	12,3

Graphes $\text{pH} = f(V_b)$ **Analyse du graphe $\text{pH} = f(V_b)$**

La courbe $\text{pH} = f(V_b)$ comprend quatre parties :

- ✓ **Partie AB** : $0 \leq V_b \leq 2$; le pH croît vite,
- ✓ **Partie BC** : $2 \leq V_b \leq 9$; le pH varie faiblement de manière presque linéaire,
- ✓ **Partie CD** : $9 \leq V_b \leq 11$; le pH augmente brusquement (saut de pH),
- ✓ **Partie DF** : $V_b \geq 11$; le pH varie faiblement de manière presque linéaire.

La courbe de dosage d'un acide faible par une base forte présente deux points d'inflexion : le point d'équivalence E et le point de demi-équivalence E' .

Equivalence acido-basique

- ✓ **Détermination graphique du point d'équivalence** : méthode des tangentes parallèles.

Le point d'équivalence E est :
$$E \left\{ \begin{array}{l} V_b = 10 \\ \text{pH} = 8,7 \end{array} \right. \Rightarrow \text{pH} = 8,7 > 7 : \text{La solution est basique.}$$

- ✓ **Propriétés de l'équivalence**

Relation d'équivalence : $n(\text{CH}_3 - \text{COOH}) = n(\text{OH}^-) \Rightarrow C_a V_a = C_b V_{bE}$ (1).

La solution est basique car les molécules d'acides éthanoïques $\text{CH}_3 - \text{COOH}$ ont été transformées en ions éthanoates $\text{CH}_3 - \text{COO}^-$.

Ainsi le bécher contient une solution d'éthanoate de sodium ($\text{CH}_3 - \text{COO}^- ; \text{Na}^+$).

Remarque :

L'ajout d'eau distillée à la solution à doser ne modifie ni le volume équivalent V_E ni le pH à l'équivalence. Il a simplement pour but de faciliter l'agitation du mélange et de favoriser l'immersion (ou immergée) des électrodes du pH-mètre. En revanche l'ajout d'eau modifie le pH initial.

Demi-équivalence

- ✓ **Détermination du point demi-équivalence** :

Le point demi-équivalence E' est :
$$E' \left\{ \begin{array}{l} V_b = \frac{V_{bE}}{2} = 5 \\ \text{pH} = 4,8 \end{array} \right.$$

✓ Propriétés de la demi-équivalence

$$* \text{ A la demi-équivalence : } V_b = \frac{V_{bE}}{2} \Rightarrow V_{bE} = 2V_b \Rightarrow (1): C_a V_a = 2C_b V_b \Rightarrow \frac{n_a}{2} = n_{bE'}$$

Donc à la demi-équivalence, la moitié de la quantité initiale d'acide éthanóique est transformée en sa base conjuguée.

* A la demi-équivalence, on a dans le mélange réactionnel :

$$\begin{cases} n(\text{CH}_3 - \text{CO}_2\text{H})_{\text{rest}} = n_a - n_{bE'} = n_a - \frac{n_a}{2} = \frac{n_a}{2} \\ n(\text{CH}_3 - \text{CO}_2^-)_{\text{for}} = n_{bE'} = \frac{n_a}{2} \end{cases} \Rightarrow n(\text{CH}_3 - \text{CO}_2\text{H})_{\text{rest}} = n(\text{CH}_3 - \text{CO}_2^-)_{\text{for}} = \frac{n_a}{2}$$

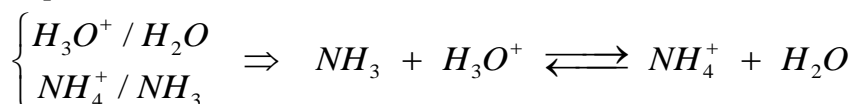
$$\text{Soit } [\text{CH}_3 - \text{CO}_2\text{H}] = [\text{CH}_3 - \text{CO}_2^-] \Rightarrow \text{pH} = \text{pKa} + \log \frac{[\text{CH}_3 - \text{CO}_2^-]_{E'}}{[\text{CH}_3 - \text{CO}_2\text{H}]_{E'}} = \text{pKa} \Rightarrow E' \left\{ \begin{array}{l} V_b = \frac{V_{bE}}{2} \\ \text{pH} = \text{pKa} \end{array} \right.$$

Remarque :

A la demi-équivalence et à son voisinage, les concentrations de l'acide faible et de sa base conjuguée sont voisines et le pH varie très peu ($[\text{CH}_3 - \text{CO}_2\text{H}] = [\text{CH}_3 - \text{CO}_2^-]$) : on a des solutions tampons.

II. Réaction entre un acide fort et une base faible**2-1. Propriétés de la réaction**Exemple : Réaction entre l'acide chlorhydrique et l'ammoniaque

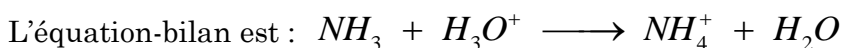
Les couples acide/base sont :



La constante de réaction est :

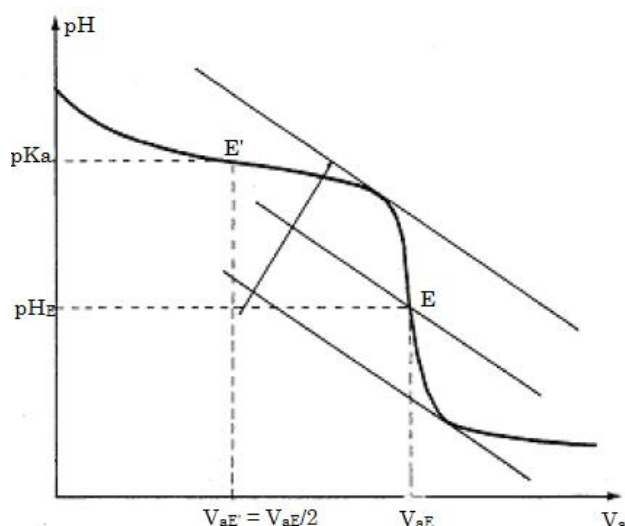
$$K = \frac{[\text{NH}_4^+]}{[\text{NH}_3] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]} = \frac{1}{K_a} = 10^{\text{pKa}_1} = 10^{9,2} \succ 10^3$$

l'ammoniaque est totale.

Généralisation :

La réaction entre un acide fort et une base faible B est exothermique et elle est totale si la constante de réaction de est supérieure ou égale à 10^3 , c'est-à-dire si le pKa du couple A/B est supérieur à 3.

2-2. Variation du pH = f(Va)



Equivalence acido-basique

Le point d'équivalence \$E\$ est :
$$E \left\{ \begin{array}{l} V_a = V_{aE} \\ pH > 7 \end{array} \right.$$

\$pH > 7\$: La solution est acide.

A l'équivalence, $n(H_3O^+) = n_0(NH_3) \Rightarrow C_a V_{aE} = C_b V_b$

Demi-équivalence

Le point demi-équivalence \$E'\$ est :

$$E' \left\{ \begin{array}{l} V_a = \frac{V_{aE}}{2} \\ pH = pKa \end{array} \right. \Rightarrow n_{aE'} = \frac{n_b}{2}$$

III. Solution tampon

3-1. Définition

Une solution tampon est un mélange équimolaire d'un acide faible et de sa base conjuguée. Son pH est égal au \$pK_a\$ du couple acide/base correspondant.

3-2. Propriétés des solutions tampons : effets tampon ou pouvoir tampon

- ☞ Le pH d'une solution tampon ne varie pratiquement pas lors d'une dilution modérée.
- ☞ Le pH d'une solution tampon varie très peu lors de l'addition d'une quantité modérée d'acide fort ou de base forte.

Le pouvoir tampon d'une solution est d'autant plus grand que les molarités de l'acide faible et de sa base conjuguée sont plus importantes dans la solution.

3-3. Obtention d'une solution tampon

On peut obtenir une solution tampon par :

- ☞ Un mélange équimolaire d'une solution d'acide faible et de sa base conjuguée,
- ☞ Dosage d'un acide faible par une base forte jusqu'à la demi-équivalence ou à son voisinage,
- ☞ Dosage d'une base faible par un acide fort jusqu'à la demi-équivalence ou à son voisinage.

3-4. Intérêt des solutions tampons :

Les solutions tampons jouent un rôle très important en particulier en biochimie et dans l'industrie.

- ✓ En pharmacie, beaucoup de solutions sont tamponnées, la dissolution des comprimés d'aspirine dans l'eau donne une solution tampon de \$pH = 5,8\$.
- ✓ En biologie, les liquides des organismes vivants sont tamponnés à un pH voisin de 7 : le pH du sang qui est essentiellement régulé par le couple \$CO_{2(aq)} / HCO_3^-\$ vaut \$pH = 7,4\$ à \$37^\circ C\$
- ✓ En chimie, des solutions tampons sont utilisées comme référence pour étalonner les pH-mètres.

ACIDES α - AMINES

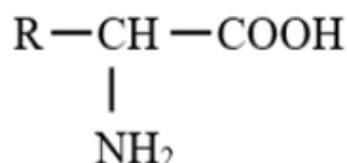
I. Généralités sur les acides α -aminés

1. Définition

On appelle acide aminé ou aminoacide, un composé organique renfermant, dans la même la molécule les deux groupements fonctionnels carboxyle et amino : c'est un composé polyfonctionnel

L'acide est α - aminé si le groupement amino est fixé sur le carbone directement lié au carbone du groupement carboxyle

La formule générale sera



Le groupe amino - NH_2 est fixé sur le carbone situé en α du groupe carboxyle

2. Nomenclature

2.1. Nomenclature systématique

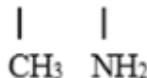
Le nom de l'acide α - aminé s'obtient en faisant précéder du terme 2- amino le nom de l'acide correspondant En effet, pour un acide α - aminé ; c'est nécessairement le carbone numéro 2 qui porte le groupe - NH_2 puis que le carbone du groupe carboxyle situé en bout de chaîne porte le numéro 1

Exemples:

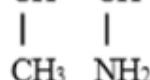
$\text{H}_2\text{N} - \text{CH}_2 - \text{COOH}$: Acide amino éthanoïque $\text{CH}_3 - \text{CH} - \text{COOH}$: Acide-2-aminopropanoïque



$\text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH} - \text{COOH}$ Acide-2-amino-3-méthylbutanoïque



$\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH} - \text{COOH}$: Acide-2-amino-3-méthylpentanoïque



2.2. Nomenclature usuelle

Les acides α - aminés naturels qui ont une très grande importance biologique ont des noms consacrés par l'usage

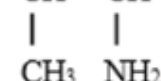
Exemples:

$\text{H}_2\text{N} - \text{CH}_2 - \text{COOH}$: Glycine (Gly)

$\text{CH}_3 - \text{CH} - \text{COOH}$: Alanine (Ala)



$\text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH} - \text{COOH}$: Valine (Val)



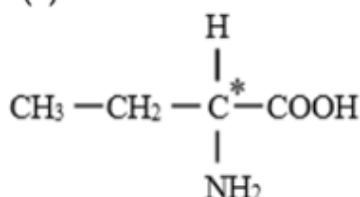
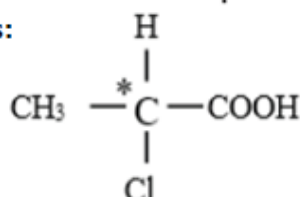
II. Stéréochimie

1. Carbone asymétrique

Un carbone asymétrique est un atome de carbone lié à quatre atomes ou groupes d'atomes tous différents

On le repère habituellement par un astérisque (*)

Exemples:



2. Chiralité

La chiralité est la propriété d'un objet de ne peut être superposable à son image dans un miroir

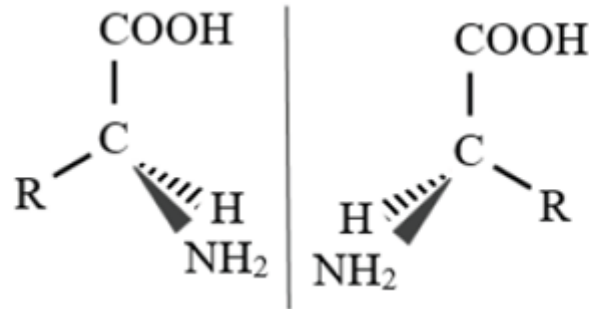
Remarque:

- Une molécule qui comporte un seul carbone asymétrique est toujours chirale

3. Enantiomères

On appelle **énantiomères** deux stéréoisomères image l'une de l'autre dans un miroir et non superposables

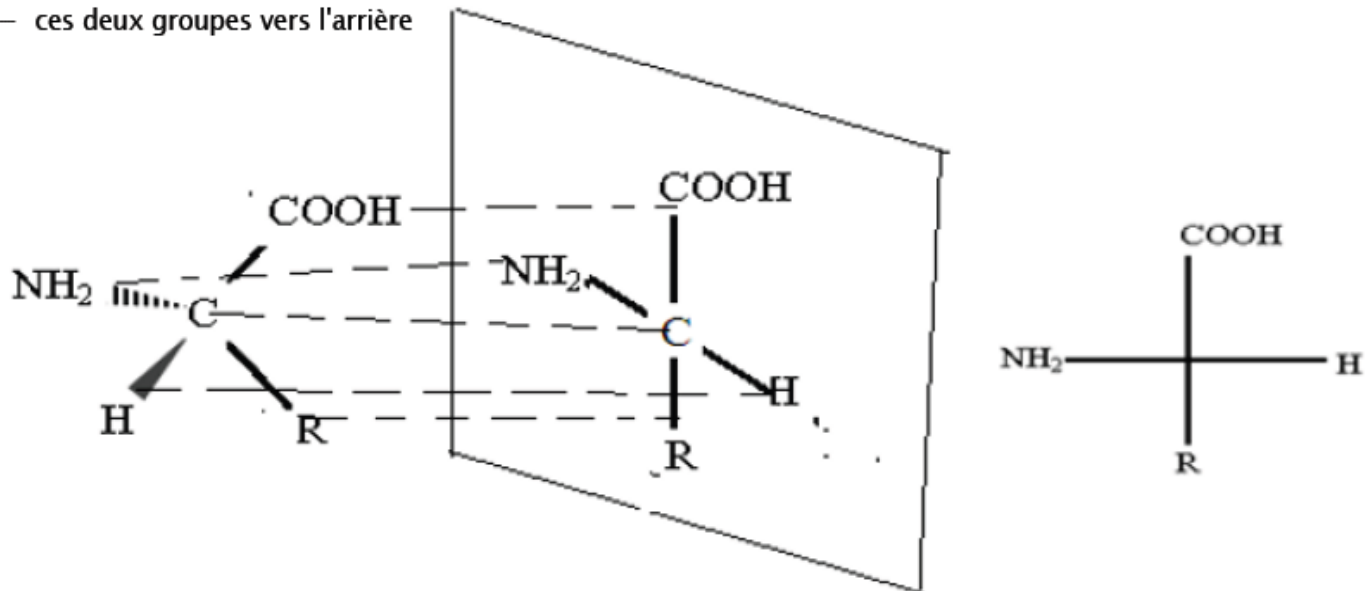
La représentation de Cram permet de représenter la géométrie spatiale des molécules : les liaisons situées dans le plan sont représentées par un trait plein, les liaisons pointant vers l'avant par un triangle plein et celles pointant vers l'arrière par un triangle hachuré



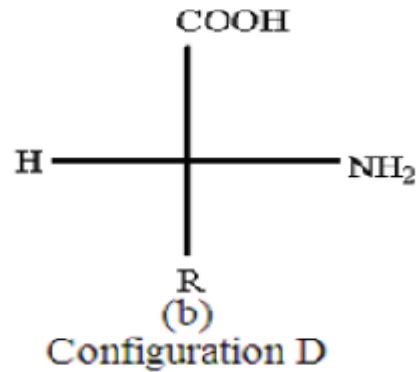
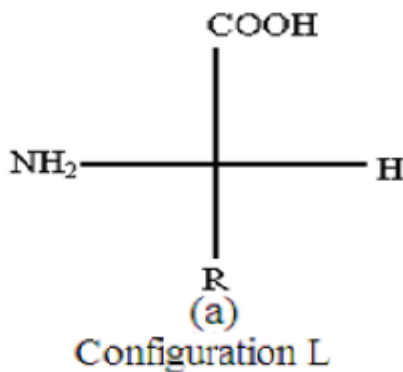
4. Représentation de Fischer

La représentation de Fischer s'obtient en projetant la structure spatiale sur le plan en respectant impérativement les conventions suivantes :

- la chaîne carbonée est disposée dans le plan vertical
- le groupe en haut, le groupe en bas
- ces deux groupes vers l'arrière



En projetant sur le plan de la feuille, on obtient deux représentations possibles



Dans la représentation (a), le groupe $-NH_2$ se situe à gauche de la chaîne carbonée, par convention l'isomère a la configuration *L*. Dans la représentation (b), le groupe $-NH_2$ se projette à droite de la chaîne carbonée, par convention l'isomère a la configuration *D*.

III. Quelques propriétés des acides α -aminés

1. Activité optique

Ces substances ont la propriété de faire tourner le plan de la polarisation d'une lumière polarisée

– soit à droite : la substance est dite dextrogyre ou présente le pouvoir rotatoire (+)

– soit à gauche : elle dite lévogyre ou présente un pouvoir rotatoire (-)

Le mélange en proportion équimolaire de ses deux isomères (+) et (-) est sans sur la lumière polarisée.

Ce mélange est appelée mélange racémique ou inactif par compensation

Remarque :

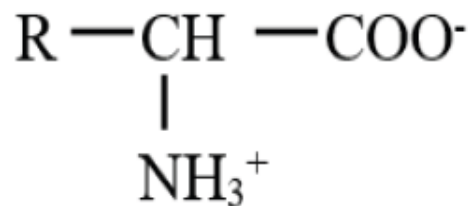
Les lettres *D* et *L* représente la configuration du carbone asymétrique dans chacun des énantiomères et non le signe de leur pouvoir rotatoire

2. Propriétés acido-basiques des acides α -aminés

Les acides α -aminés possèdent à la fois les propriétés des acides carboxyliques et des amines.

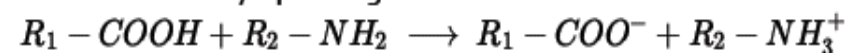
Comme un acide avec une amine, le composé $R-CH(NH_2)-COOH$ ne peut pas exister en solution aqueuse.

Il sous la forme :



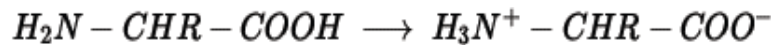
Cette espèce chimique est appelée zwitterion ou amphion ou ion dipolair

Un acide carboxylique réagit avec une amine selon la réaction :



L'acide fournit un proton qui est capté par la base.

Dans le cas d'un acide α -aminé, cette réaction acide-base se produit de manière intramoléculaire



base acide zwitterion

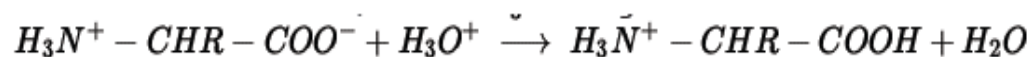
On passe de la forme moléculaire à la forme zwitterion (amphion)

A l'état solide une molécule d'acide α -aminé se trouve sous la forme zwitterion

En solution aqueuse, en l'absence d'apport d'acide et de base, la forme zwitterion est largement prépondérante

2.1 Forme cationique en milieu acide

En milieu fortement acide, les ions H_3O^+ réagissent avec le zwitterion selon la réaction pratiquement totale :



On obtient la forme cationique

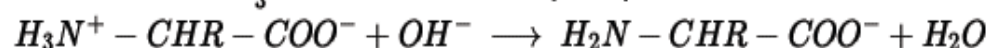
Le couple cation/zwitterion est : $H_3N^+-CHR-COOH | H_3N^+-CHR-COO^-$.

Il est caractérisé par un pK_{a1} .

L'espèce majoritaire à $pH < pK_{a1}$ est l'acide du couple, c'est-à-dire, la forme cationique

2.2 Forme anionique en milieu basique

En milieu fortement basique, les ions OH^- majoritaire réagissent avec le zwitterion en déprotonant le groupe ammonium $-NH_3^+$ selon une réaction pratiquement totale :



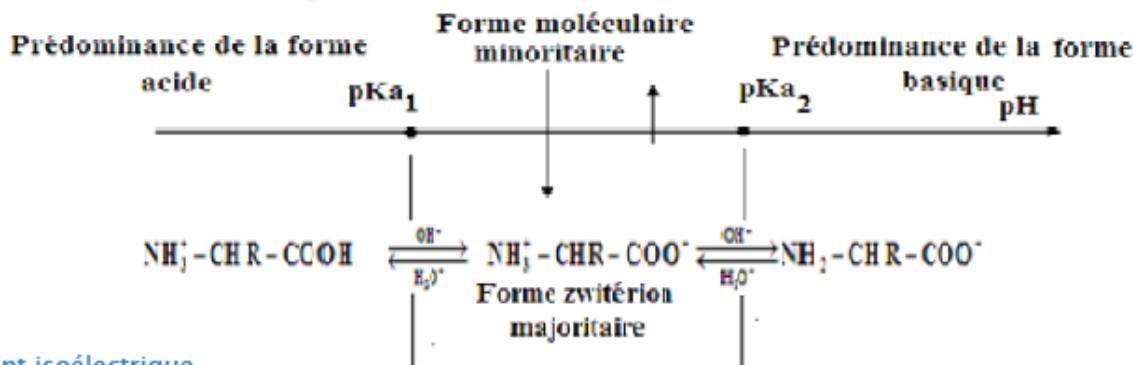
On obtient la forme anionique

Le couple zwitterion/anion est : $H_3N^+-CHR-COO^- | H_2N-CHR-COO^-$.

Il est caractérisé par un pK_{a2} .

L'espèce majoritaire à $pH > pK_{a2}$ est l'acide du couple, c'est-à-dire, la forme anionique

2.3 Forme prédominante selon pH



2.4 Point isoélectrique

Pour chaque acide aminé, il existe une valeur spécifique du pH où la charge globale de la molécule est nulle.

Cette valeur de pH (pH_i) représente le point isoélectrique où la concentration du zwitterion de l'acide aminé est maximale.

La charge globale portée par les différentes formes ioniques de l'acide aminé en solution dépend de la valeur du pH de la solution.

La charge électrique globale est nulle lorsque le pH de la solution est égal au pH_i .

Le point isoélectrique peut être estimé à partir de l'équation de Hendersøn-Hasselbalch :

$$pH = pKa_1 + \log \frac{[R - CH(NH_3^+) - COOH]}{[R - CH(NH_3^+) - COO^-]}$$

$$pH = pKa_2 + \log \frac{[R - CH(NH_3) - COO^-]}{[R - CH(NH_3^+) - COO^-]}$$

Au point isoélectrique $pH = pH_i$
 et $[R - CH(NH_3^+) - COOH] = [R - CH(NH_3) - COO^-]$

$$\Rightarrow 2pH_i = pKa_1 + pKa_2 + \log \frac{[R - CH(NH_3^+) - COOH]}{[R - CH(NH_3^+) - COO^-]} + \log \frac{[R - CH(NH_3) - COO^-]}{[R - CH(NH_3^+) - COO^-]}$$

$$\Rightarrow 2pH_i = pKa_1 + pKa_2 + \log \frac{[R - CH(NH_3^+) - COOH]}{[R - CH(NH_3^+) - COO^-]} \times \frac{[R - CH(NH_3) - COO^-]}{[R - CH(NH_3^+) - COO^-]} = pKa_1 + pKa_2$$

$$\Rightarrow \boxed{pH_i = \frac{pKa_1 + pKa_2}{2}}$$

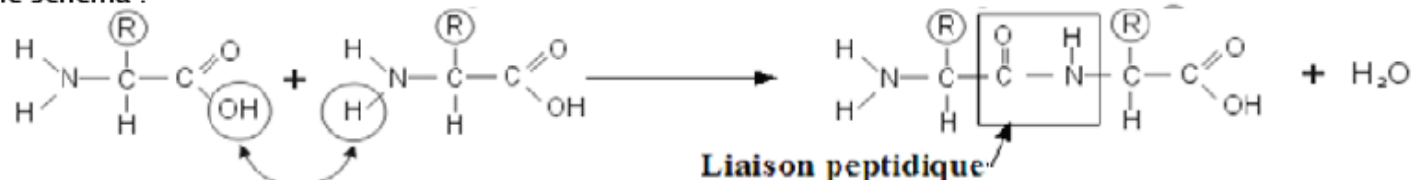
Elle est positive lorsque le pH de la solution est inférieur au pH_i et négative lorsque le pH de la solution est supérieur au pH_i .

IV. Les polypeptides et les protéines

1. Les polypeptides

1.1 Liaison peptidique

Cette liaison s'établit entre la fonction amine d'un acide aminé et la fonction acide d'un autre acide aminé selon le schéma :



En fonction du nombre d'acides aminés liés les uns aux autres, on est en présence des peptides ou des polypeptides.

A partir de cinquante acides aminés environ, les composés sont appelés protéines

Lors qu'on écrit la formule d'un peptide, on écrit toujours à gauche le groupement $-NH_2$ terminal et à droite le groupement $-COOH$ terminal

Exemple :

Le tripeptide formé dans l'ordre par les trois acides α -aminés Gly, Ala, Val, s'écrit donc :



1.2 Synthèse des peptides

Si mélange plusieurs acides aminés, les possibilités de combinaison augmentent avec le nombre d'acides aminés

Pour obtenir un peptide donné, on bloque certaines fonctions et on active d'autres

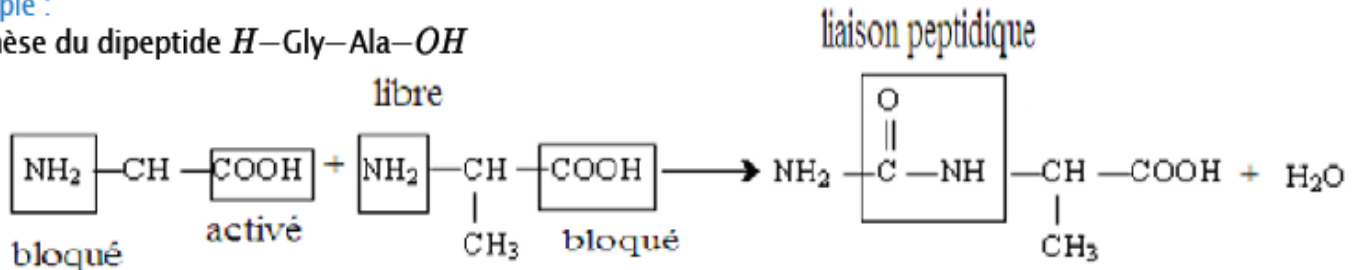
Il faut que ces réactions soient réversibles.

Par exemple :

- on bloque la fonction carboxyle par la formation d'un ester
- on bloque la fonction amine par la formation d'un amide
- on active la fonction carboxyle en la transformant en chlorure d'acyle
- on débloque le groupe amino et le groupe carboxyle des acides- α aminés qui étaient bloqués.

Exemple :

synthèse du dipeptide $H-Gly-Ala-OH$



Remarque

La dénomination d'acide α -aminé N -terminal est réservée à celui qui porte la fonction amine $-NH_2$ libre et d'acide α -aminé C -terminal à celui qui porte le groupe carboxyle libre $-COOH$

2. Les protéines

Les protéines sont des polypeptides complexes de masse molaire très élevée

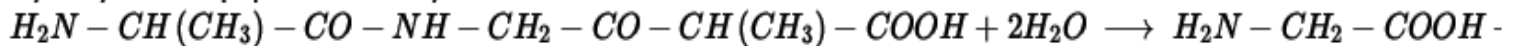
Ce sont des macromolécules formées par un enchainement d'acides α -aminés : ce sont des polyamides

Remarques :

- La structure primaire d'une protéine est définie par la nature des acides α -aminés constitutifs et par l'ordre selon lequel ils sont assemblés dans la chaîne du polypeptide
- On obtient des acides α -aminés constitutifs par hydrolyse soit à chaud en milieu acide ; soit dans des conditions beaucoup plus douces en présence d'enzymes

Exemple :

Hydrolyse du tripeptide $Ala-Gly-Ala$



Compléments

Une protéine, aussi appelée protide (anglicisme) est un assemblage (ou séquence) d'acides aminés liés par des liaisons peptidiques.

On parle de protéine lorsque plus de 50 acides aminés sont liés au sein d'une chaîne d'acides aminés.

Les propriétés des acides aminés (charge, hydrophobicité...) gouvernent la structure de la protéine, globulaire ou fibrillaire, que l'on peut décrire à différents niveaux :

- la structure primaire, qui est la séquence linéaire des acides aminés dans la protéine ;
- la structure secondaire, qui rend compte de l'organisation de groupes d'acides aminés en éléments structuraux simples : hélices alpha, feuilletts et tours bêta, autres structures ;
- la structure tertiaire, qui correspond au repliement de la protéine dans l'espace tridimensionnel (on parle aussi de structure tridimensionnelle décrite par les coordonnées des atomes dans l'espace).

Cette structure rend compte de l'organisation entre eux des éléments de structure secondaire ;

- la structure quaternaire, qui définit l'association (multimérisation) entre des protéines de structures primaires identiques (homoassociation) ou distinctes (hétéroassociation).

Les protéines ont des fonctions très diverses : certaines pourront avoir une fonction structurale (elles participent à la cohésion structurale des cellules entre elles), enzymatique (elles catalysent les réactions chimiques de la matière vivante) ou encore une fonction de messenger (pour les protéines impliquées dans des processus de signalisation cellulaire)

Exercice d'application

Les protéines entrent dans la constitution des organismes vivants et participent à leur fonctionnement en intervenant dans un grand nombre de réactions biochimiques.

Ce sont des macromolécules constituées par association d'acide α -aminé par liaison peptidique.

On se propose d'identifier un peptidique noté D résultant de la réaction entre deux acides α -aminés A et B

1. Des méthodes d'analyses quantitatives ont permis de déterminer les pourcentages massiques de carbones d'hydrogène et du composé A :

Soient : $\%C = 40.45$ $\%H = 7.87$ $\%N = 15.72$

1.1 Le composé A ne contenant qu'un atome d'azote par molécule vérifié que sa formule brute s'écrit $C_3H_7NO_2$

1.2 Le composé est précisément un acide α -aminé.

Écrire sa formule semi développée et donner son nom dans la nomenclature officielle

2. Par réaction de A avec un autre acide α -aminé B de formule brute $C_5H_{11}O_2$

2.1 Écrire la formule semi développée de B sachant que sa molécule a deux atomes de carbones asymétriques et donner son nom dans la nomenclature officielle.

2.2 Représentez les couples d'énantiomères en utilisant la représentation de Fischer et en précisant les conventions utilisées

2.3 Écrire à l'aide de formules développées l'équation bilan traduisant la synthèse du peptide D sachant qu' A est l'acide α -aminé C -terminal.

Encadrer la liaison peptidique.

3. On effectue une décarboxylation de A par chauffage.

Le composé organique azoté obtenu est dissous dans l'eau pour donner une solution S .

3.1 Écrire l'équation bilan de la réaction de décarboxylation d' A .

Nommer le produit E .

3.2 La concentration molaire de S est $C = 0.15 \text{ mole/L}$ et son $pH = 12$.

Déterminer le pK_a du couple acide-base correspondant à E .

3.3 Dans la pratique ce $pK_a = 11$.

Sur un axe gradué en unité de pH placer les domaines de prédominance des diverses formes en justifiant la réponse

PARTIE PHYSIQUE

P 05 : GENERALITES SUR LES CHAMPS MAGNETIQUES – CHAMPS MAGNETIQUES DES COURANTS.

Introduction :

Le magnétisme découvert par le berger chinois Magnès sur le Mont Ida est devenu une partie de la physique grâce à **Ampère** qui a étudié les propriétés magnétiques des aimants.

Au début du XIX^{ème} siècle **Oersted** à découvert qu'un circuit électrique parcouru par un courant est source d'un phénomène magnétique et depuis on désigne par électromagnétisme la partie de la physique qui étudie les phénomènes magnétiques créés par les courants et les aimants.

I. Généralités sur les champs magnétiques :

I.1 Notion d'aimant :

I.1.1 Propriétés des aimants

Les aimants ont la propriété d'attirer des objets en fer. Cette propriété est appelée le *magnétisme*.

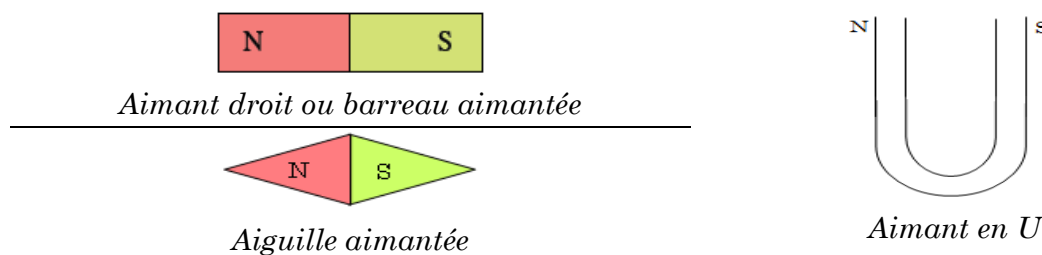
On distingue deux types d'aimants :

Aimant naturel : un minerai constitué principalement d'oxyde magnétique de fer (Fe_3O_4).

Aimant artificiel : obtenu par aimantation de pierre d'acier.

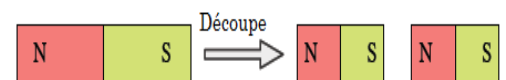
I.1.2 Pôles d'un aimant :

Lorsqu'on suspend une barre aimantée, elle s'oriente dans une direction proche de la direction Nord-Sud géographique. L'extrémité de la barre qui pointe vers le Nord est appelée *pôle nord* et l'autre extrémité *pôle sud*.

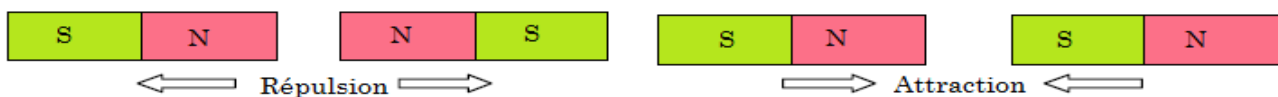


I.1.3 Expérience de l'aimant brisé :

En découpant une barre aimantée en deux, on obtient deux couples de pôles nord et sud : les pôles magnétiques apparaissent toujours par paires ; il n'existe pas de monopôle magnétique.



I.2 Interaction magnétique

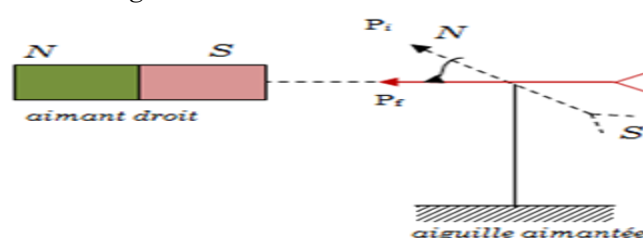


Deux pôles de même nom se repoussent et deux pôles de noms différents s'attirent.

I.3 Notion de champ magnétique

I.3.1. Mise en évidence

Approchons un aimant droit à une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical.



a) Observation et interprétation :

- L'aiguille aimantée dévie et prend une direction bien définie.
- Cette déviation de l'aiguille aimantée est due à la modification des propriétés de l'espace autour de l'aimant droit.

b) Conclusion

L'aiguille aimantée subit une force magnétique \vec{F}_m exercée par l'aimant droit : on dit que l'aimant droit crée un *champ magnétique* (noté \vec{B}) à son voisinage.

NB :

- L'aimant droit est source de champ magnétique,
- L'aiguille aimantée est un détecteur de champ magnétique.

I.3.2. Définition :

Un champ magnétique règne dans une région de l'espace si une aiguille aimantée placée dans cette région prend une direction bien déterminée.

I.3.3. Vecteur champ magnétique**a) Définition et Caractéristiques :**

En chaque point de l'espace, le champ magnétique est représenté par un vecteur champ magnétique B dont les caractéristiques sont :

- ✓ **Point d'application :** Le point considéré,
- ✓ **Direction :** L'axe de l'aiguille aimantée,
- ✓ **Sens :** Du pôle sud vers le pôle nord de l'aiguille (SN),
- ✓ **Intensité :** Valeur du champ magnétique notée B .

Dans le système international d'unité, l'intensité du champ magnétique s'exprime en **tesla (T)**. Elle est mesurée avec un **teslamètre**.

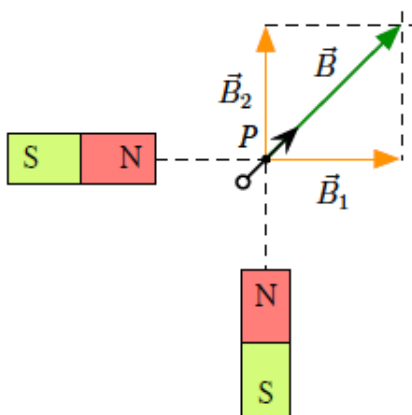
N.B : Le champ magnétique B peut s'exprimer aussi en Gauss :

$$1G = 10^{-4}T$$

b) Superposition de champs magnétiques

En présence de plusieurs aimants, le vecteur champ résultant en un point est égale à la somme vectorielle des vecteurs champs magnétiques que l'on observerait en présence de chacun des aimants seuls : **c'est le principe de superposition :**

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i$$

Exemple de deux champs magnétiques :

$$\text{On a : } \vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 \Rightarrow B = \sqrt{(\vec{B}_1 + \vec{B}_2)^2}$$

$$\Rightarrow B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2 \cos(\vec{B}_1, \vec{B}_2)} \quad \text{Or } (\vec{B}_1, \vec{B}_2) = \frac{\pi}{2}$$

$$\Rightarrow \cos(\vec{B}_1, \vec{B}_2) = 0 \quad \text{D'où } \Rightarrow B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$$

Remarque : Dans un repère orthonormé $(O; \vec{i}; \vec{j})$, on a :

$$\vec{B} \begin{cases} B_x = B_{1x} + B_{2x} \\ B_y = B_{1y} + B_{2y} \end{cases}$$

I.3.4. Ligne de champ - Spectre magnétique

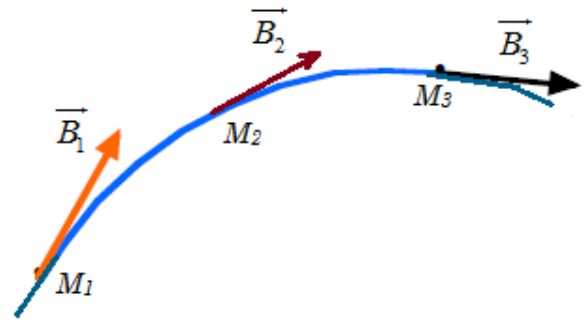
a) Définition :

- Une ligne de champ est une courbe qui en chacun de ses points lui est tangent un vecteur champ magnétique.

Elle est orientée dans le même sens que \vec{B} .

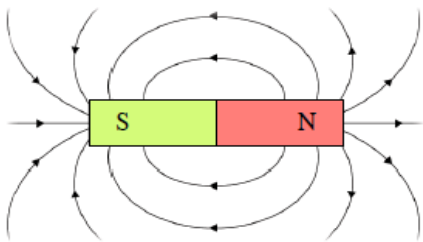
- Un *spectre magnétique* est constitué par un ensemble de lignes de champ.

NB : Plus les lignes de champ sont rapprochées, plus le champ est intense.

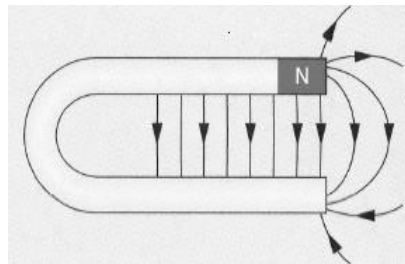


b) Exemple de spectre

Spectre de l'aimant droit

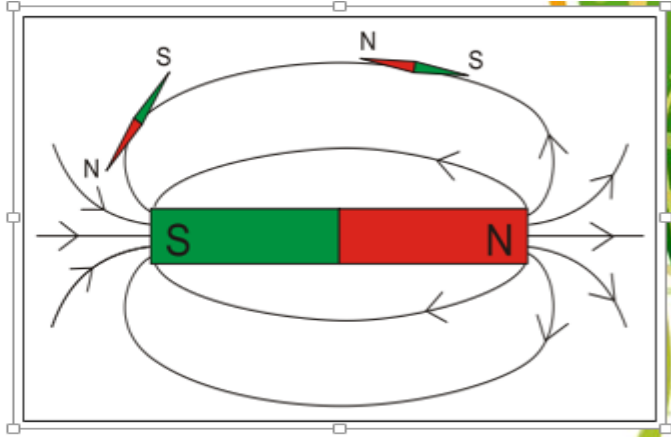
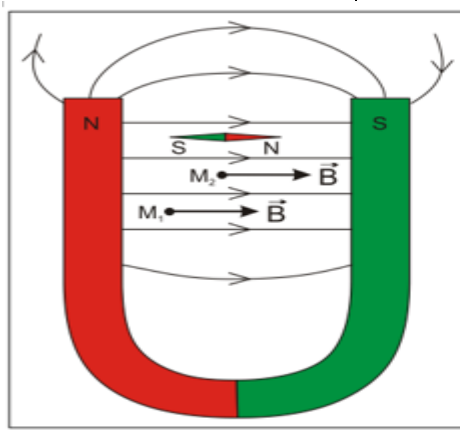


Spectre de l'aimant en U



A l'intérieur d'un aimant en U, les lignes de champ sont droites et parallèles entre elles.

Le champ magnétique \vec{B} garde la même direction, le même sens et la même intensité : on dit que \vec{B} est *uniforme*.



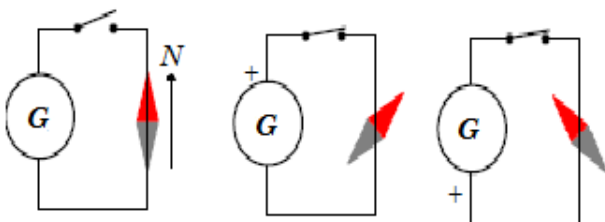
II. Champ magnétique des courants électriques :

II-1. Mise en évidence :

L'effet magnétique du courant électrique fut découvert par Christian Oersted.

II.1.1 Expérience :

Plaçons une aiguille aimantée placée au voisinage immédiat d'un fil de cuivre parcouru par un courant électrique



II.1.2 Observations :

- ✓ L'aiguille aimantée subit une déviation.
- ✓ Plus l'intensité du courant dans le fil est élevée, plus l'aiguille est déviée (α augmente).
- ✓ Si on inverse le sens du courant dans le fil, l'aiguille aimantée dévie en sens inverse

II.1.3 Interprétation :

Cette déviation de l'aiguille aimantée est due à la modification des propriétés de l'espace autour du fil de cuivre parcouru par un courant électrique

II.1.4 Conclusion :

Un courant électrique crée aussi un champ magnétique : **c'est l'électromagnétisme.**

II.2 Propriété :

L'intensité du champ magnétique B est proportionnelle à l'intensité du courant I suivant la relation :

$$\underline{B = \mu_0 \cdot k \cdot I} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ perméabilité magnétique du vide} \\ k = \text{cste dépend de la géométrie du circuit et de la distance} \end{cases}$$

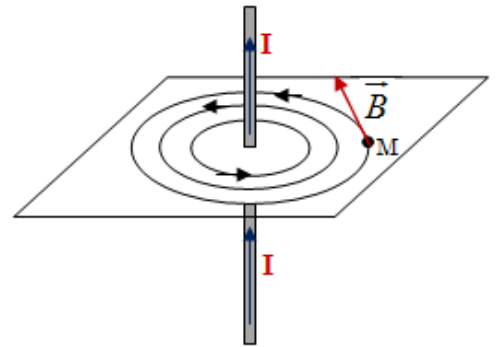
II.3 Champ magnétique crée par un fil rectiligne infiniment long

II.3.1 Définition :

Un fil rectiligne parcouru par un courant d'intensité I crée un champ magnétique en tout point de son voisinage.

II.3.2 Propriété :

Les lignes de champ magnétique d'un courant électrique rectiligne sont des cercles ayant pour axe le fil transportant le courant.



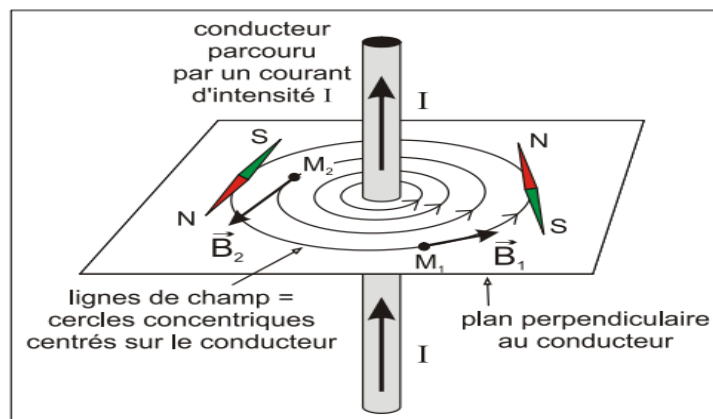
II.3.3 Caractéristiques de \vec{B} :

- ✓ Point d'application : Point M,
- ✓ Direction : tangente à la ligne de champ,
- ✓ Sens : Donné par plusieurs règles parmi lesquelles le bonhomme d'Ampère, la main droite, tire-bouchon, etc...

$$\checkmark \quad \underline{\text{Norme} : B = \frac{\mu_0}{2\pi d} \cdot I = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{d} \cdot I}$$

Remarque :

Il n'y a pas de pôles N ni S.
Le sens de \vec{B} dépend du sens de I .
L'intensité B du champ augmente avec l'intensité de courant et diminue avec la distance au conducteur.



II.4 Quelques règles d'orientation sur un fil :

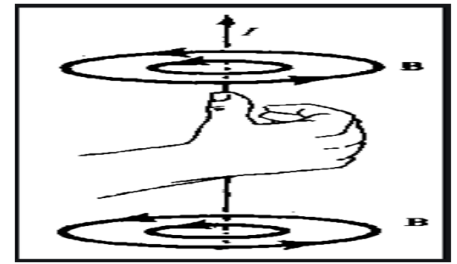
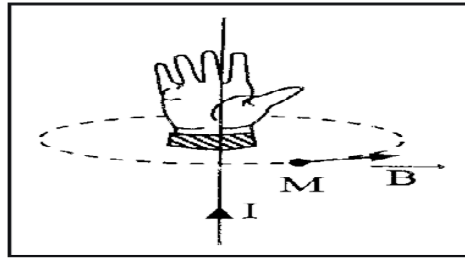
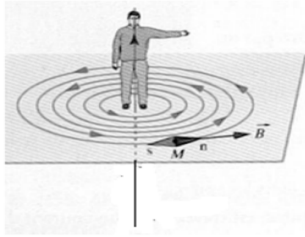
Pour trouver la direction et le sens du vecteur champ magnétique \vec{B} créée par un courant électrique, on peut l'une des règles mnémotechniques suivantes :

II.4.1 Règle du bonhomme d'ampère :

-1^{er} Cas : Le bonhomme d'Ampère (fictif) couché sur le fil de telle sorte que le courant lui entre par les pieds et sort par la tête, il regarde le point M; **son bras gauche tendu indique à la fois la direction et le sens du champ magnétique \vec{B}**

II.4.2 Règle de la main droite :

-1^{er} Cas : La main droite est posée sur le fil de sorte que le courant entre par le poignet et sort par les 4 doigts, la paume orientée vers le point M ; **la pousse écartée latéralement donne le sens du champ magnétique \vec{B}**



Pouce : sens du courant
Doigts courbés : sens de \vec{B}

Remarque : un vecteur où un courant perpendiculaire au plan d'étude sera représenté par :

- ⊙ Lorsqu'il est dirigé vers l'avant du plan,
- ⊗ Lorsqu'il est dirigé vers l'arrière du plan.

II.5 Champ magnétique crée par une bobine plate

II.5.1 Définition :

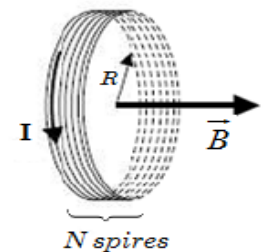
Une bobine est un enroulement de fil conducteur sur un cylindre de longueur l et de rayon r .

Une bobine plate est une bobine dont la longueur est petite par rapport à son rayon.

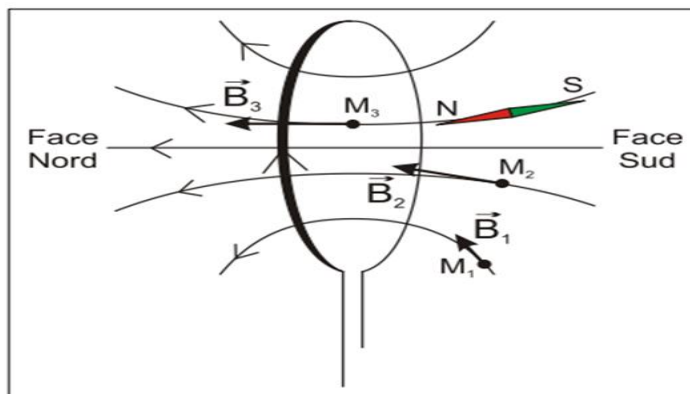
II.5.2 Propriétés :

Une bobine plate de rayon r , comportant N spires et parcouru par un courant I , crée un champ magnétique dont les caractéristiques sont :

- ☞ Point d'application : Centre de la bobine
- ☞ Direction : Axe de la bobine.
- ☞ Sens : Donné par la règle de la main droite ou bonhomme d'ampère
- ☞ Intensité : Au centre de la bobine $B = \frac{\mu_0 \cdot N}{2 \cdot R} \cdot I$



Toutes les lignes sortent par une face appelée **face nord (N)** et entrent par l'autre face appelée **face sud (S)**.
Le sens de \vec{B} dépend du sens de I .
Le champ au centre est d'autant plus important que l'intensité de courant est plus élevée et que le rayon est plus petit.



II.6 Champ magnétique crée par un solénoïde (Bobine longue)

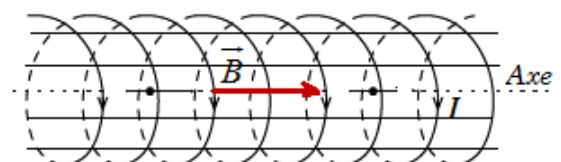
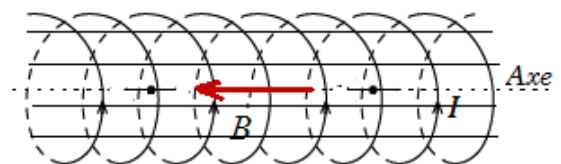
II.6.1 Définition :

Un solénoïde est une bobine dont la longueur est grande par rapport à son rayon.

II.6.2 Propriétés :

Un solénoïde de longueur L comprenant N spires parcouru par un courant électrique I crée un champ magnétique dont :

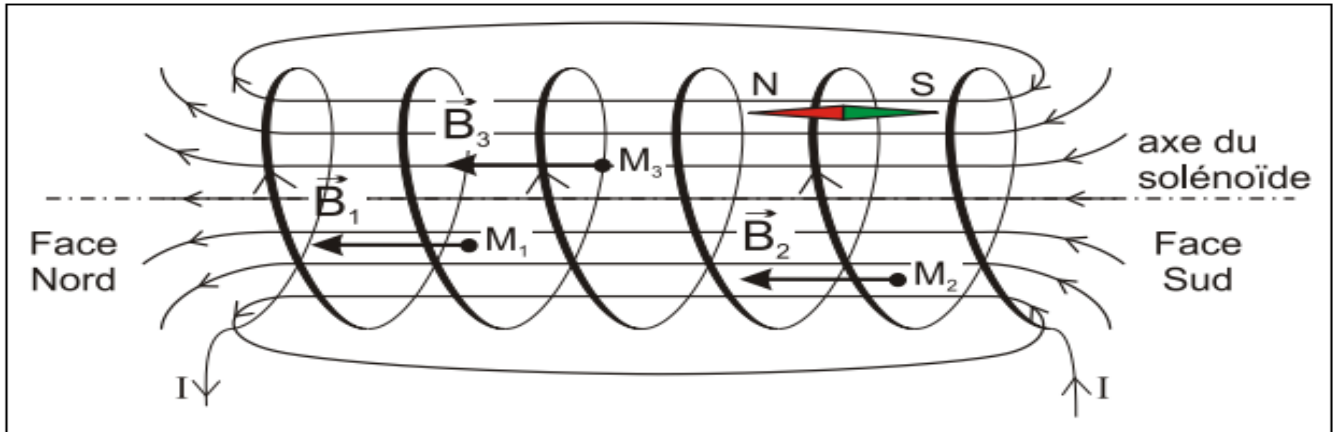
- ☞ A l'intérieur du solénoïde, le champ magnétique est uniforme et les lignes de champ sont parallèles à l'axe du solénoïde,



- ☞ La direction du champ magnétique est suivant l'axe du solénoïde.
- ☞ Le sens du champ magnétique est donné par la règle de la main droite,

☞ L'intensité de \vec{B} est :
$$B = \frac{\mu_0 \cdot N}{L} \cdot I = \mu_0 \cdot n \cdot I$$

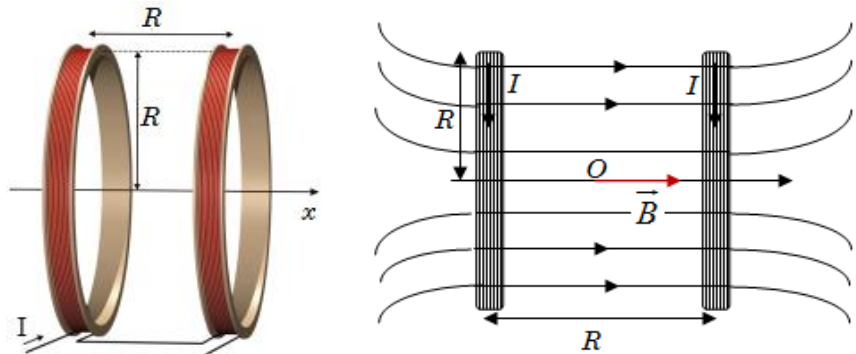
$n = N/L$ est le nombre de spires par mètre.



II.7 Champ magnétique créé par les bobines d'Helmholtz

II.7.1 Définition :

Les bobines d'Helmholtz sont constituées de deux bobines plates identiques séparées par une distance égale à leur rayon sur leur axe commun



II.7.2 Propriétés :

- A l'intérieur des bobines, le champ magnétique est uniforme et les lignes de champ sont parallèles,
- La direction et le sens du champ magnétique sont donnés par la règle de la main droite,

e) L'intensité de \vec{B} est :
$$B = 0,72 \frac{\mu_0 \cdot N}{R} \cdot I$$

II.8 Quelques règles d'orientation sur une bobine :

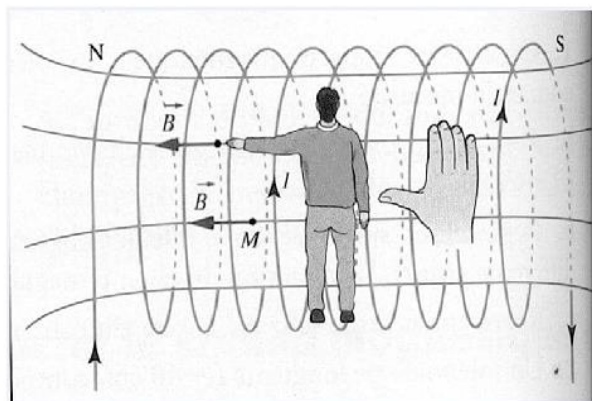
Pour trouver la direction et le sens du vecteur champ magnétique \vec{B} créée par un courant électrique, on peut l'une des règles mnémotechniques suivantes :

II.7.1 Règle du bonhomme d'ampère :

-2^{ème} Cas : Le bonhomme d'Ampère (fictif) couché sur la bobine de telle sorte que le courant lui entre par les pieds et sort par la tête, il regarde à l'intérieur de la bobine ; son bras gauche tendu indique à la fois la direction et le sens du champ magnétique \vec{B}

II.7.2 Règle de la main droite :

- 2^{ème} Cas : On empoigne la bobine avec la main droite de sorte que le courant entre par le poignet et sort par les 4 doigts, la paume orientée vers l'intérieur de la bobine ; la pousse écartée latéralement donne le sens du champ magnétique \vec{B}

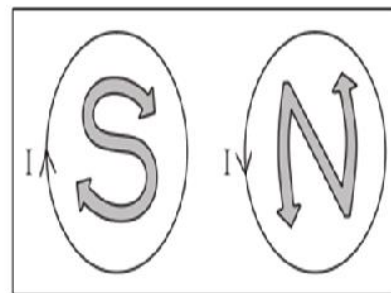


Règle : (pour les bobines uniquement) :

On regarde sur l'une des faces et on examine le sens du courant :

s'il correspond au sens indiqué par la lettre S on regarde sur une face Sud ;

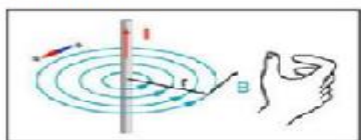
s'il correspond à celui indiqué par la lettre N on regarde sur une face Nord.



Remarque :

- il existe d'autres règles comme la règle du tir-bouchon

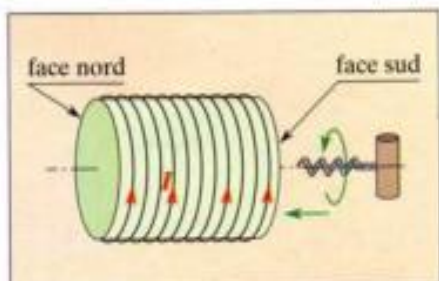
Le fil infini :



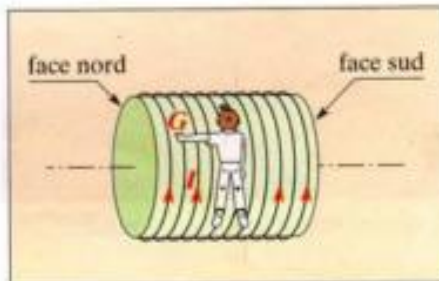
La spire :



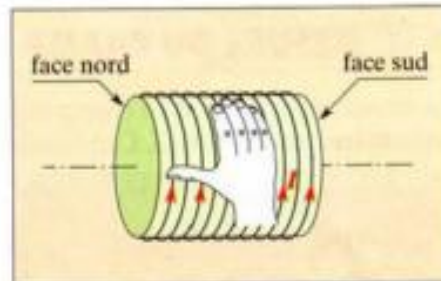
- **Résumé des règles :**



Règle du tir bouchon



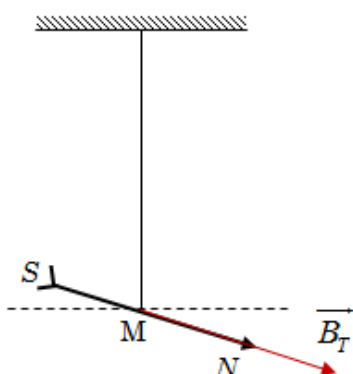
Règle du bonhomme d'ampère



Règle de la main droite

III. Champ magnétique terrestre

III-1. Mise en évidence



Plaçons une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical en un point M de l'espace loin de toute source apparente de champ magnétique.

L'aiguille aimantée s'oriente toujours dans une direction bien définie : le pôle nord est incliné vers le bas.

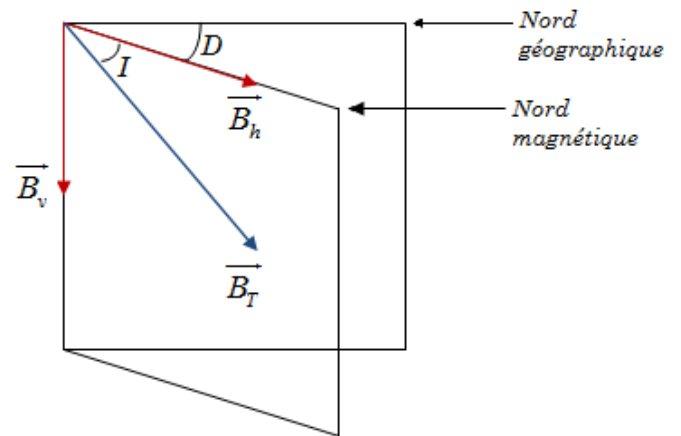
On dit autour de l'aiguille aimantée règne un champ magnétique appelé *champ magnétique terrestre* ou *champ géomagnétique* \vec{B}_T .

III-2. Caractéristiques

En un point donné, le vecteur champ magnétique terrestre \vec{B}_T possède deux composantes :

- ✓ Une composante verticale \vec{B}_v dirigée vers le centre de la Terre,
- ✓ Une composante horizontale \vec{B}_h dirigée vers le nord géographique.

$$\vec{B}_T = \vec{B}_h + \vec{B}_v$$



L'angle entre \vec{B}_T et \vec{B}_h est appelé *inclinaison I* (approximativement $I = 60^\circ$)

\vec{B}_h fait avec le méridien géographique un angle appelé *déclinaison D* ; (D est très petit).

Intensité : $B_T = 4.10^{-5} \text{ T}$; $B_h = B_T \cdot \cos i = 2.10^{-5} \text{ T}$ et $B_v = B_T \cdot \sin i = 3,5.10^{-5} \text{ T}$.

Le champ magnétique terrestre se superpose aux champs créés par les autres sources (aimants, courant) mais il est souvent négligé.

Remarque :

L'aiguille aimantée placée à l'absence de toute source magnétique, s'oriente sur le nord magnétique (B_h).

- * Les aiguilles des **boussoles** ne sont généralement mobiles que dans un plan horizontal : elles indiquent donc la direction de \vec{B}_h .
- * La direction de \vec{B}_h n'est pas exactement celle du méridien géographique : l'écart angulaire varie avec le temps et vaut actuellement à peu près 1° .

P 06 : MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE

UNIFORME : LOI DE LORENTZ

Introduction :

Le physicien Néerlandais, **Hendrick Antoon Lorentz** avait mis en évidence une loi qui porte son nom : la loi de Lorentz. Cette loi qui est à la base du fonctionnement de quelques dispositifs (télévision, accélérateurs, oscilloscope,...) explique la nature du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme.

I. Etude expérimentale du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme : loi de Lorentz

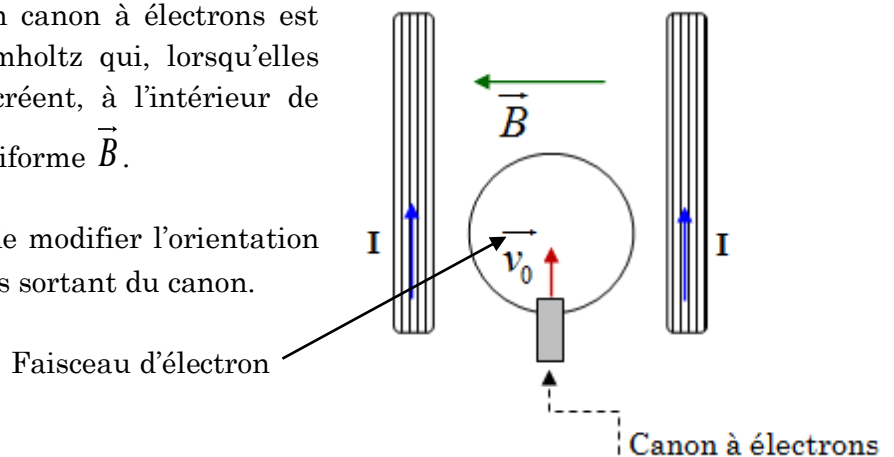
I-1. Mise en évidence

I.1.1. Dispositif expérimental

Une ampoule sphérique munie d'un canon à électrons est placée entre deux bobines de Helmholtz qui, lorsqu'elles sont parcourues par un courant, créent, à l'intérieur de l'ampoule, un champ magnétique uniforme \vec{B} .

Remarque :

Une rotation de l'ampoule permet de modifier l'orientation de la vitesse initiale \vec{v}_0 des électrons sortant du canon.



I.1.2. Observations

- ☞ Si \vec{v}_0 est colinéaire à \vec{B} , les électrons décrivent une trajectoire **rectiligne** ;
- ☞ Si \vec{v}_0 fait un angle α avec \vec{B} , les électrons décrivent une trajectoire **hélicoïdale** ;
- ☞ Si $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$, les électrons décrivent une trajectoire **circulaire**.

I.1.3. Conclusion

Cette expérience qualitative montre qu'une particule chargée q pénétrant dans un champ magnétique uniforme \vec{B} est soumise à une force magnétique \vec{F}_m appelée force de Lorentz. Cette force dépend de l'orientation de la vitesse initiale \vec{v}_0 par rapport au champ \vec{B} .

Remarque :

En faisant varier la valeur B du champ magnétique et la vitesse v_0 des électrons on constate que :

- ✓ Le rayon de la trajectoire R diminue si B augmente (champ intense) ;
- ✓ Le rayon de la trajectoire R augmente si v_0 augmente.

I-2. Loi de Lorentz :

Une particule de charge q se déplaçant avec une vitesse \vec{v} dans un champ magnétique uniforme \vec{B} est soumise à une force magnétique appelée force de Lorentz donnée par la relation :

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

I-3. Caractéristiques de la force de Lorentz

☞ **Point d'application :** la particule elle-même considéré comme point matériel

☞ **Direction :** \vec{F}_m perpendiculaire au plan $(q\vec{v}, \vec{B}) \Rightarrow \vec{F}_m \perp \vec{v}$ et $\vec{F}_m \perp \vec{B}$;

☞ **Sens :** déterminé à l'aide de la règle de la paume de la main droite :

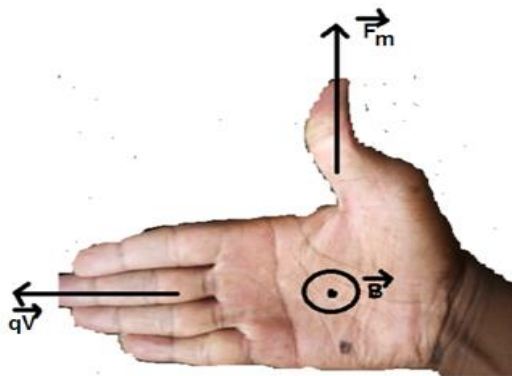
✓ Les doigts \rightarrow sens de $q\vec{v}$

✓ La paume \rightarrow sens du champ magnétique \vec{B}

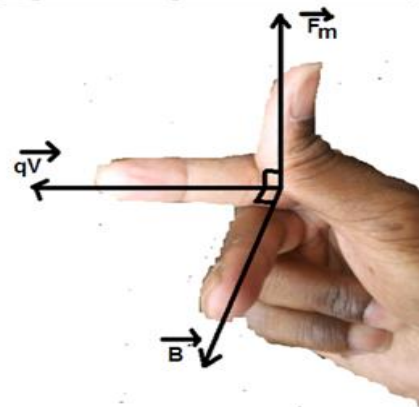
✓ Le pouce \rightarrow sens de la force de Lorentz \vec{F}_m

☞ **Norme :** $F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin(\vec{v}, \vec{B})$.

Règle du paume de la main droite



Règle des 3 doigts de la main droite



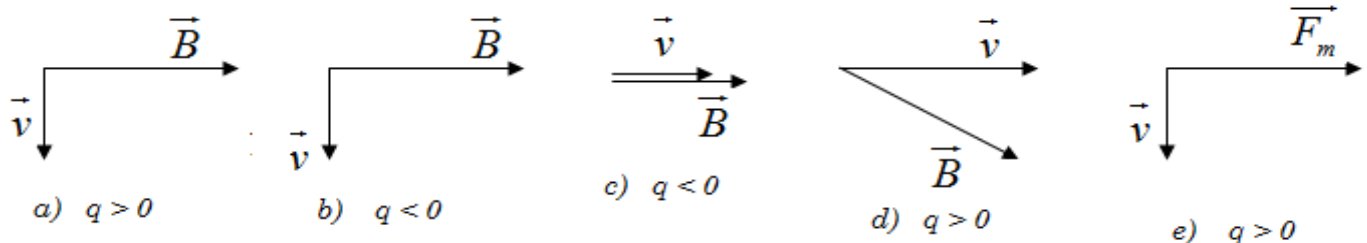
Remarque :

- La force de Lorentz ne s'exerce pas sur une particule neutre ($q = 0$) ou sur une particule immobile ($v = 0$) ;
- La force de Lorentz est nulle si la vitesse \vec{v} et le champ \vec{B} sont colinéaires ;
- On peut négliger le poids de la particule devant la force de Lorentz.
- Dans une région de l'espace où règnent un champ électrique \vec{E} et un champ magnétique \vec{B} (champ électromagnétique), la force de Lorentz s'écrit :

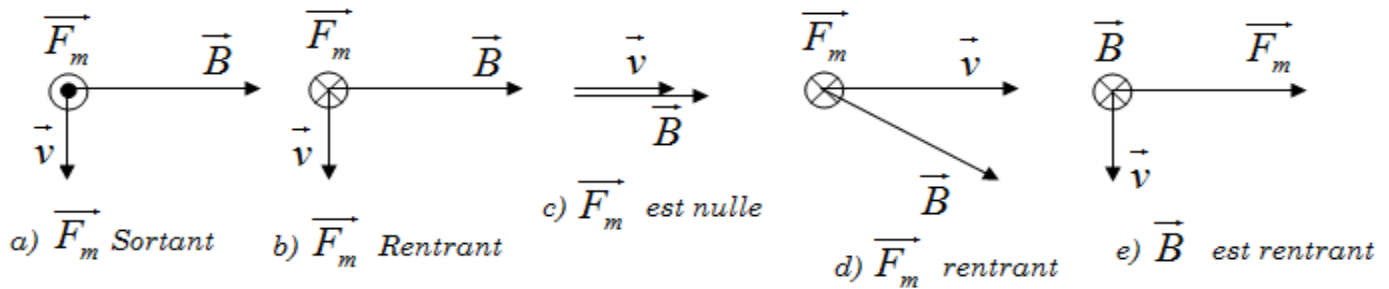
$$\underline{\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})} \quad \text{Force électromagnétique}$$

Exemple :

Représenter dans chaque cas, le vecteur manquant en respectant la direction et le sens.



Solution :



II. Etude théorique du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme :

Considérons une particule de charge q , de masse m animée d'une vitesse \vec{v}_0 et pénétrant dans une région où règne un champ magnétique uniforme \vec{B} tel que $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$.

II.1 Etude dynamique : Accélération

* Système : Particule

* Référentiel : T.S.G

* Bilan des forces : $\begin{cases} \vec{F}_m & \text{Force magnétique} \\ \vec{P} & \text{Poids de la particule (} P \ll F_m \text{)} \end{cases}$

* Appliquons le T.C.I. : $\vec{F}_m = m\vec{a}$

$$\Rightarrow m\vec{a} = q\vec{v} \wedge \vec{B} \Rightarrow \vec{a} = \frac{q}{m} \vec{v} \wedge \vec{B} \quad \text{L'accélération dépend des caractéristiques de la}$$

particule (sa charge q et sa masse m).

II.2 Etude cinématique : Nature du mouvement

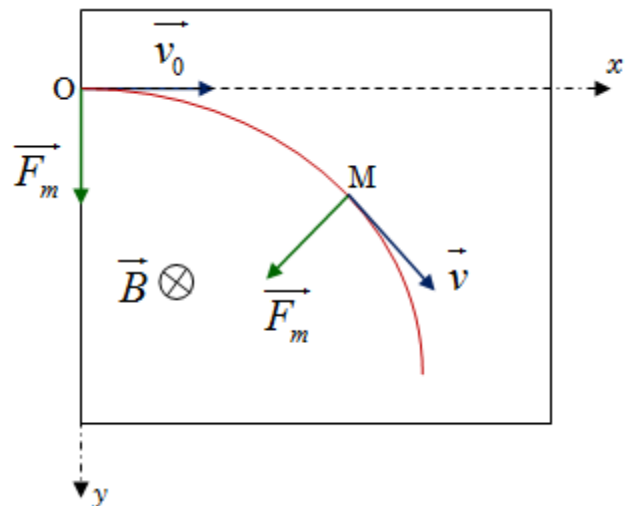
II.2.1 Planéité du mouvement

$$\vec{a} = \frac{q}{m} \vec{v} \wedge \vec{B} \Rightarrow \vec{a} \perp \vec{B} \Rightarrow \vec{a} \perp (\vec{Oz}) ;$$

$$\text{Alors } a_z = \frac{dv_z}{dt} = 0 \Rightarrow \underline{v_z = cste = v_{0z} = 0}$$

$$\text{D'où } v_z = \frac{dz}{dt} = 0 \Rightarrow \underline{z = cste = z_0 = 0}$$

Quelque soit t , $z = 0$: Le mouvement s'effectue dans le plan (xOy) perpendiculaire à \vec{B} .



II.2.2 Uniformité du mouvement

$$\vec{a} = \frac{q}{m} \vec{v} \wedge \vec{B} \Rightarrow \vec{a} \perp \vec{v} \Rightarrow \vec{a} \perp \vec{U}_t \Rightarrow a_t = \frac{dv}{dt} = 0 \Rightarrow \underline{v = cste = v_0} ;$$

Le mouvement de la particule est uniforme.

II.2.3 Nature de la trajectoire

$$a = a_n = \frac{v_0^2}{\rho} \Rightarrow \frac{|q| \cdot v_0 \cdot B}{m} = \frac{v_0^2}{\rho} \Rightarrow \underline{\rho = \frac{m \cdot v_0}{|q| \cdot B}}$$

Pour une particule donnée, m , v , q et B sont des constantes ; donc $\rho = \text{constante} = R$.

$$\underline{\rho = R = \frac{m \cdot v_0}{|q| \cdot B} = \text{cste}} \quad \text{La trajectoire est } \underline{\text{circulaire}}.$$

Conclusion

Une particule chargée entrant dans un champ magnétique \vec{B} uniforme avec une vitesse \vec{v}_0 perpendiculaire au champ, décrit un **mouvement circulaire uniforme** dans un plan perpendiculaire au champ \vec{B} .

Le rayon de la trajectoire est donné par l'expression : $\underline{R = \frac{m \cdot v_0}{|q| \cdot B}}$.

Remarque : La force de Lorentz est centripète c'est pourquoi le mouvement est circulaire uniforme.

II.2.4 Vitesse linéaire, Vitesse angulaire, Période et fréquence

- Vitesse linéaire : $R = \frac{m \cdot v}{|q| \cdot B} \Rightarrow \underline{v = \frac{|q| \cdot B \cdot R}{m}}$
- Vitesse angulaire : $\omega = \frac{v}{R} \Rightarrow \underline{\omega = \frac{|q| \cdot B}{m}}$
- La période : $T = \frac{2\pi \cdot R}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{m \cdot v}{|q| \cdot B} \Rightarrow \underline{T = \frac{2\pi \cdot m}{|q| \cdot B}}$
- La fréquence : $N = \frac{1}{T} \Rightarrow \underline{N = \frac{|q| \cdot B}{2\pi \cdot m}}$

II.3 Etude énergétique

☞ La puissance \mathcal{P} développée par la force magnétique est toujours nulle :

$$\underline{\mathcal{P} = \vec{F}_m \cdot \vec{v} = 0} \quad \text{Car } \vec{F}_m \perp \vec{v}.$$

☞ Le travail δW de la force magnétique est nul,

$$\left. \begin{array}{l} \delta W = \mathcal{P} dt \\ \mathcal{P} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \underline{\delta W = 0}.$$

☞ Le champ magnétique ne modifie ni l'énergie cinétique ni la vitesse de la particule :

$$\underline{\text{TEC}} : Ec_f - Ec_i = W(\vec{F}_m) = 0 \Rightarrow Ec = \text{cste} \Rightarrow v = v_0 = \text{cste}$$

III. Quelques applications de la force de Lorentz

III-1. Application 1 : déflexion magnétique

III.1.1 Principe :

Considérons un faisceau de particule de charge $q > 0$, pénétrant en O dans une région où règne un champ magnétique \vec{B} uniforme perpendiculaire à la vitesse \vec{v}_0 des particules.

$(\vec{v}_0, \vec{v}_s) = \alpha$ est appelé **déviat**ion magnétique, Y

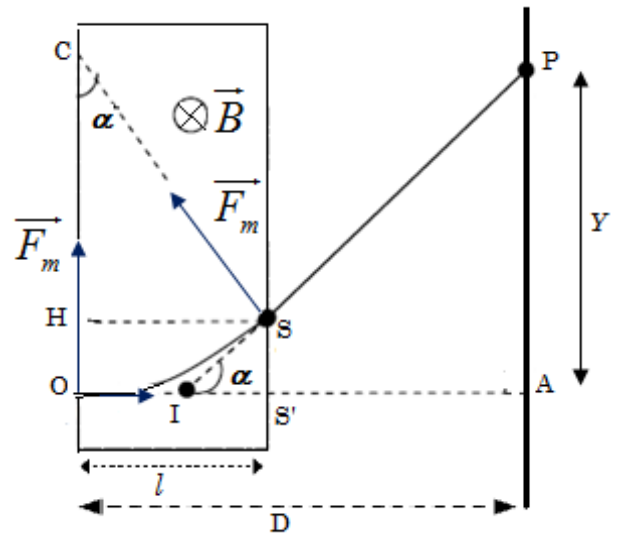
est la **déflexion magnétique**.

Pour des déviations faibles (α petit) :

$$\ell \square D \Rightarrow IA \approx OA = D \text{ et } \sin \alpha \approx \tan \alpha = \alpha$$

$$\text{On a : } \begin{cases} \sin \alpha = \frac{HS}{CS} = \frac{\ell}{R} \\ \tan \alpha = \frac{Y}{IA} \approx \frac{Y}{D} \end{cases} \Rightarrow \frac{Y}{D} = \frac{\ell}{R}$$

$$\Rightarrow Y = \frac{\ell \cdot D}{R} = \frac{|q|}{m} \cdot \frac{\ell \cdot D \cdot B}{v}$$



Remarque :

On rencontre la déflexion magnétique dans les tubes cathodiques par exemple un oscilloscope. Elle participe aussi à la formation des images dans un téléviseur.

III.1.2 Enoncé n°1 :

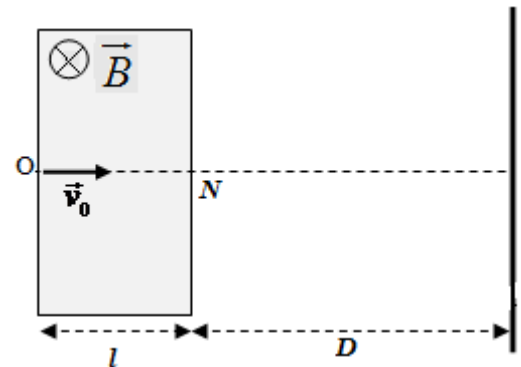
Des électrons pénètrent en un point O dans un champ magnétique uniforme \vec{B} avec une vitesse \vec{v}_0 comme indiqué sur la figure ci-contre.

1. Dans quel sens seront déviés les électrons lorsqu'ils pénètrent dans le champ \vec{B} ?
2. Préciser la nature de leur mouvement dans le domaine délimité par le champ \vec{B} ainsi que ses caractéristiques.
3. Ils sortent du champ en un point N avec une vitesse \vec{v} et heurtent en un point I un écran fluorescent. Quelle est la nature de leur mouvement entre N et I ?
 - a) Calculer l'angle α supposé faible que fait \vec{v} avec \vec{v}_0 .
 - b) Calculer la déflexion magnétique subie par les électrons.

On donne : $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $v_0 = 4,2 \cdot 10^6 \text{ m.s}^{-1}$; $B = 2 \text{ mT}$;
 $\ell = 1 \text{ cm}$; $D = 39 \text{ cm}$.

Corrigé

III.2 Application 2 : le spectrographe de masse ou de Dempster

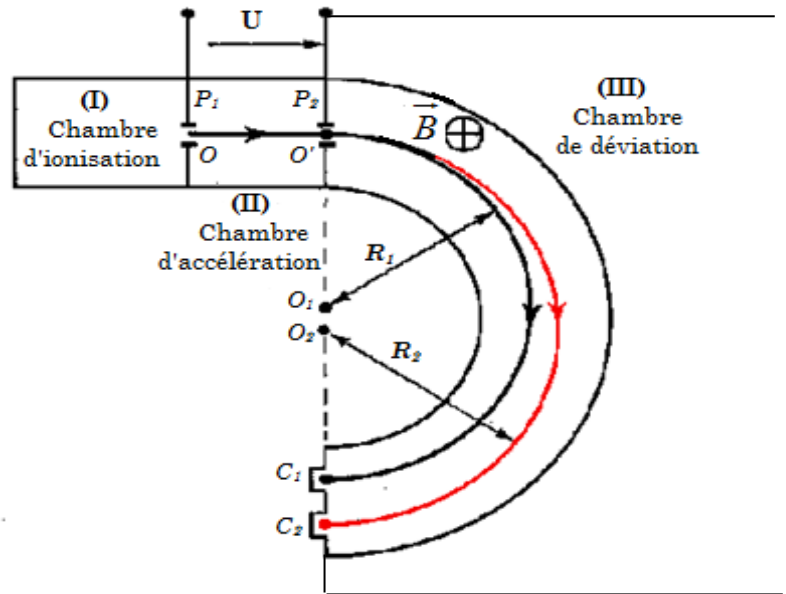


III.2.1 Enoncé :

C'est un appareil qui permet d'identifier et de séparer des isotopes d'un élément chimique.

Il comprend trois parties :

- ☞ Une chambre d'ionisation où sont produits les ions ;
- ☞ Une chambre d'accélération où les ions sont accélérés par un champ électrique \vec{E}
- ☞ Une chambre de déviation où les ions (isotopes) déviés par un champ magnétique \vec{B} décrivent des trajectoires circulaires et sont recueillis par des collecteurs (détecteur ou capteur) en C_1 et C_2 .

**III.2.2 Enoncé n°2 :**

A l'intérieur d'une chambre d'ionisation, on produit des ions lithium Li^+ qui existent sous forme de deux isotopes ${}^6Li^+$ et ${}^7Li^+$ de masses respectives m_1 et m_2 . Les ions Li^+ produits pénètrent en O dans la chambre d'accélération où règne un champ électrique \vec{E} avec une vitesse négligeable pour y être accéléré jusqu'en O' . (figure voir page 6).

1. Quel est le signe de la tension $U_{P_1P_2} = U$?

2. Les ions sortent en O' respectivement avec des vitesses v_1 et v_2 . Montrer que $\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$

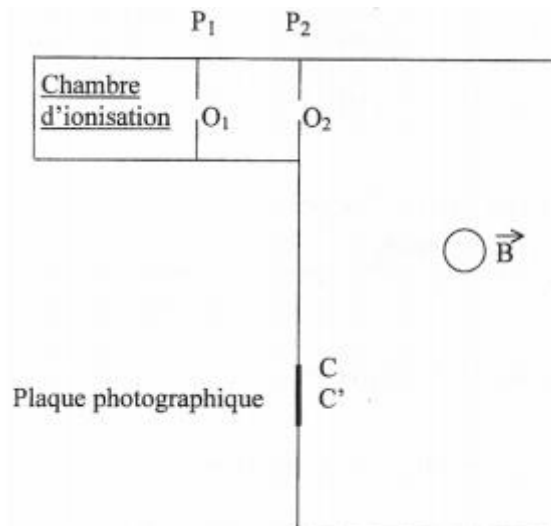
3. Les ions pénètrent ensuite dans une région où règne un champ magnétique uniforme B orthogonal au plan de la figure, d'intensité $B = 0,2 T$.

- a) Préciser en le justifiant le sens du vecteur champ magnétique B pour que les ions Li^+ parviennent au collecteur en A_1 et A_2 .
- b) Montrer que le mouvement d'un ion s'effectue dans un plan à préciser.
- c) Etablir la nature du mouvement. Exprimer les rayons de courbure R_1 et R_2 pour les ions ${}^6Li^+$ et

${}^7Li^+$ puis montrer que $\frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}}$

d) Exprimer la distance A_1A_2 en fonction de B , m , m' , U et e . La calculer

On donne : $|U_{P_1P_2}| = 10^4 V$; $m_1 = 6.u$; $m_2 = 7.u$; $u = 1,67.10^{-27} kg$; $e = 1,6.10^{-19} C$

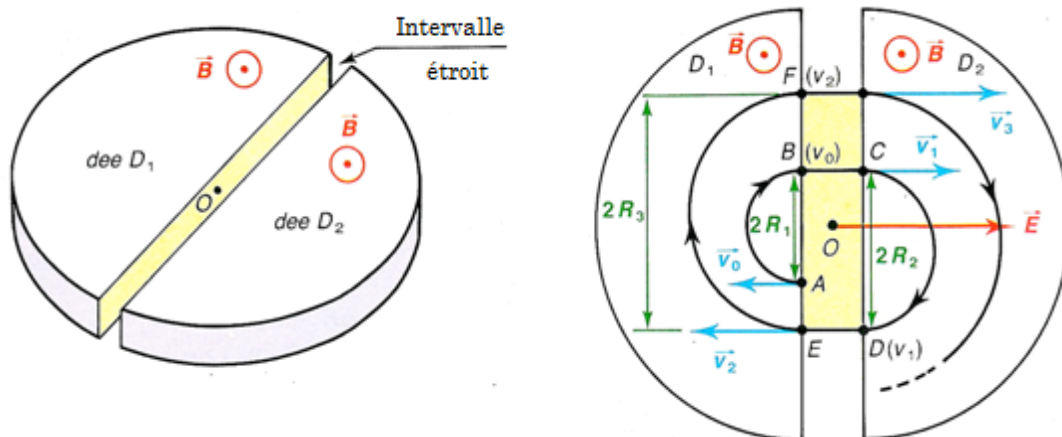


III.3 Application 3 : le cyclotron deux dées

III.3.1 Principe :

Découverte en 1929 par E. O. LAWRENCE aux USA, un cyclotron est un **accélérateur de particules chargées**, constitué de deux demi-cylindres conducteurs creux D_1 et D_2 séparés par un intervalle étroit.

A l'intérieur des deux demi-cylindres appelés « **dées** », règne un champ magnétique uniforme \vec{B} parallèle à l'axe des cylindres et on les relie à une tension alternative. Dans l'intervalle étroit règne un champ électrique \vec{E} variable.



☞ Période et fréquence :

La durée de parcours des demi-cercles est constante, égale à la demi-période : $\tau = \frac{T}{2} = \frac{\pi R}{v}$

$$\text{Or, } R = \frac{m.v}{|q|.B} \Rightarrow \tau = \frac{T}{2} = \frac{\pi.m}{|q|.B} \quad \underline{\text{Elle est indépendante de la vitesse.}}$$

$$\text{La période est : } T = \frac{2\pi.m}{|q|.B} \Rightarrow \text{La fréquence du générateur doit donc valoir : } N = \frac{|q|.B}{2\pi.m}$$

☞ Rayon du demi-cercle maximal :

$$\Delta E_c = w(\vec{F}_e) \Rightarrow \frac{1}{2}mv_{max}^2 = n(2|q|U) \Rightarrow \frac{1}{2}m \left(\frac{R_{max}|q|.B}{m} \right)^2 = 2n|q|U \text{ donc } R_{max} = \sqrt{\frac{4nmU}{|q|B^2}}$$

n : étant le nombre de tours.

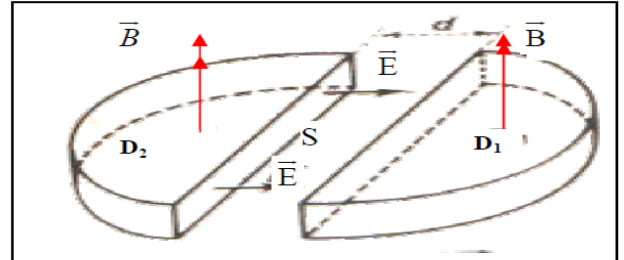
III.3.2 Enoncé n°3 : extrait Bac S1-2008

Un cyclotron est un dispositif constitué de deux demi-cylindres D_1 et D_2 , appelés « dees », séparés par une distance très faible d devant leur diamètre. Le tout est placé dans le vide. Un champ magnétique \vec{B} perpendiculaire au plan de la figure est créé dans D_1 et D_2 . Entre les « dees » et sur la distance d agit un champ électrique uniforme \vec{E} . Ce champ \vec{E} est constamment nul à l'intérieur des deux « dees ». On suppose que la d.d.p U entre D_1 et D_2 reste constante.

On donne : masse du proton $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg ;
Charge élémentaire $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C ; $d = 1$ cm ;
 $U = 4000$ V.

3.2.1 Au voisinage immédiat de D_2 une source S émet des protons avec une vitesse initiale négligeable.

Préciser la nature du mouvement du proton entre D_2 et D_1 et établir l'expression de la vitesse V_1 du proton au moment il pénètre dans D_1 , en fonction de e , m et U . Calculer V_1 .



(0,5 pt)

3.2.2 Le proton pénètre dans D_1 , sa vitesse \vec{V}_1 est perpendiculaire à \vec{B} .

- Montrer que le mouvement du proton dans D_1 est circulaire uniforme.

- Donner l'expression du rayon R_1 du demi-cercle décrit par le proton en fonction de e , m , B et U .

- Exprimer littéralement le temps de transit τ mis par le proton pour décrire ce demi-cercle ; montrer qu'il est indépendant de la vitesse donc non modifiée par la présence du champ électrique accélérateur. Faire l'application numérique avec $B = 1$ T.

(01 pt)

3.2.3 Au moment précis où le proton quitte D_1 , on inverse le sens de \vec{E} , le proton pénètre ainsi dans D_2 avec une vitesse V_2 .

- Etablir l'expression de la vitesse V_2 du proton et donner l'expression du rayon R_2 de la trajectoire décrite dans D_2 .

- Exprimer le temps de transit dans D_2 . Le comparer à τ .

(0,5 pt)

3.2.4 Quand le proton quitte D_2 , on inverse à nouveau le sens de \vec{E} . La particule, accélérée par la même tension U , pénètre dans D_1 avec une vitesse V_3 , y décrit un demi-cercle de rayon R_3 , ainsi de suite...

Exprimer le rayon R_n de la $n^{\text{ième}}$ trajectoire demi-circulaire en fonction du rayon R_1 de la première trajectoire.

Donner la valeur de n pour $R_n = 0,14$ m. Calculer la vitesse correspondante V_n du proton.

Quelle serait la d.d.p constante qui aurait donné cette vitesse au proton initialement émis sans vitesse initiale ? Commenter.

(01,5 pt)

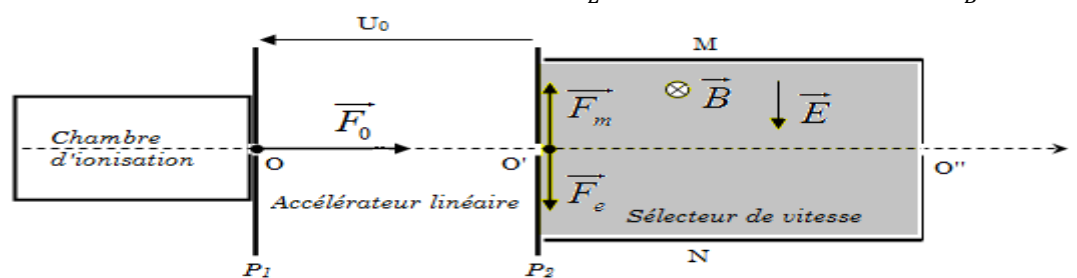
III.4 Application 4 : le filtre de vitesse ou filtre de Wien

III.4.1 Principe :

C'est un dispositif dans lequel règne à la fois un champ électrique \vec{E} et un champ magnétique \vec{B} :

Il est constitué :

- ☞ d'une chambre d'ionisation ;
- ☞ d'un accélérateur linéaire ;
- ☞ d'un sélecteur de vitesse.



Les ions produits dans la chambre d'ionisation sont accélérés dans l'accélérateur linéaire et pénètrent entre les plaques M et N où ils sont soumis simultanément à l'action d'un champ électrique uniforme \vec{E} et d'un champ magnétique uniforme \vec{B} .

Seuls les ions ayant une vitesse v telle que $\vec{F}_e + \vec{F}_m = \vec{0}$ ($M.R.U$) pourront traverser l'ouverture O'' .

$$\vec{F}_e + \vec{F}_m = \vec{0} \Rightarrow F_e = F_m \Rightarrow |q|.E = |q|.v.B \Rightarrow v = \frac{E}{B} = \frac{U}{d.B}$$

III.4.2 Enoncé n° 4 :

Données : $m_1 = 5,01 \cdot 10^{-27}$ kg, $m_2 = 6,68 \cdot 10^{-27}$ kg et $m_3 = 10,02 \cdot 10^{-27}$ kg, $B = 5 \cdot 10^{-2}$ T, $U_0 = 3,9$ kV, $E = 9 \cdot 10^3$ V.m⁻¹

1) Une chambre d'ionisation produit des noyaux d'hélium ${}^3_2\text{He}^{2+}$, ${}^4_2\text{He}^{2+}$ et ${}^6_2\text{He}^{2+}$ de masses respectives m_1 , m_2 , m_3 . Leur poids est négligeable devant les forces électromagnétiques qu'ils subissent.

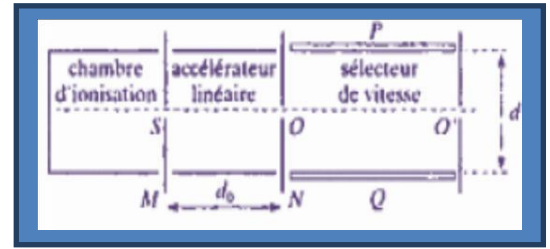
Ils pénètrent en S sans vitesse initiale dans un accélérateur linéaire

où ils sont soumis à l'action d'un champ électrique uniforme \vec{E}_0

créé par une différence de potentiel $U_0 = V_M - V_N$.

On désignera par \vec{V}_1 , \vec{V}_2 et \vec{V}_3 les vecteurs vitesses en O des ions ${}^3_2\text{He}^{2+}$, ${}^4_2\text{He}^{2+}$ et ${}^6_2\text{He}^{2+}$,

On notera $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ la charge électrique élémentaire.



1.a- Déterminer le signe de U_0 et représenter le champ électrique \vec{E}_0 dans l'accélérateur.

1.b- Exprimer l'accélération d'un ion ${}^4_2\text{He}^{2+}$ en fonction de U_0 , d_0 , e et m_2 , préciser la nature de son mouvement.

2) Montrer qu'en O, à la sortie de l'accélérateur, $m_1 V_1^2 = m_2 V_2^2 = m_3 V_3^2$

3) Les ions pénètrent ensuite dans un sélecteur de vitesse limité par les plaques P et Q. Ils sont alors soumis à l'action simultanée de deux champs : un champ électrique uniforme \vec{E} créé par une différence de potentiel positive $U = V_Q - V_P$ et un champ magnétique \vec{B} uniforme perpendiculaire au plan de la figure.

3.a- Représenter le champ magnétique \vec{B} pour que la force électrique et la force magnétique aient même direction, mais des sens contraires.

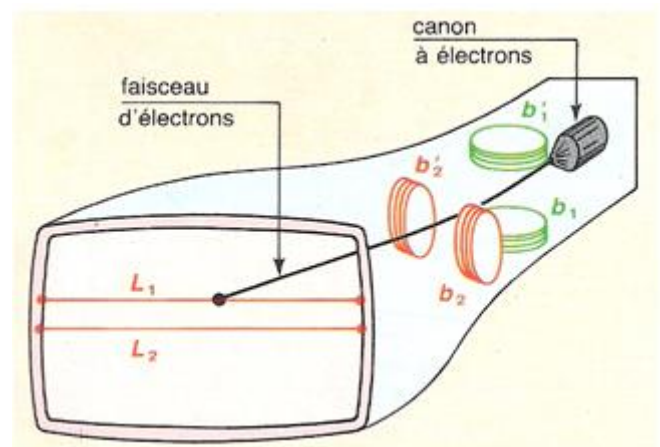
3.b- On règle la valeur de U de façon que le mouvement des ions ${}^4_2\text{He}^{2+}$ soit rectiligne uniforme de trajectoire OO' . Exprimer U en fonction de B , V_2 et d puis calculer V_2 . En déduire les vitesses V_2 et V_3 .

3.c- Représenter, justification à l'appui, l'allure des trajectoires des ions ${}^3_2\text{He}^{2+}$ et ${}^6_2\text{He}^{2+}$.

III.5 Application 5 : le tube de télévision

Le principe du tube de télévision est basé sur la déflexion d'un faisceau d'électron par un champ magnétique créé par deux paires de bobines.

- ☞ La paire de bobines (b_1 , b_1') disposées horizontalement crée un champ vertical qui permet le balayage en ligne ;
- ☞ La paire de bobines (b_2 , b_2') disposées verticalement crée un champ horizontal qui permet de passer d'une ligne à une autre.



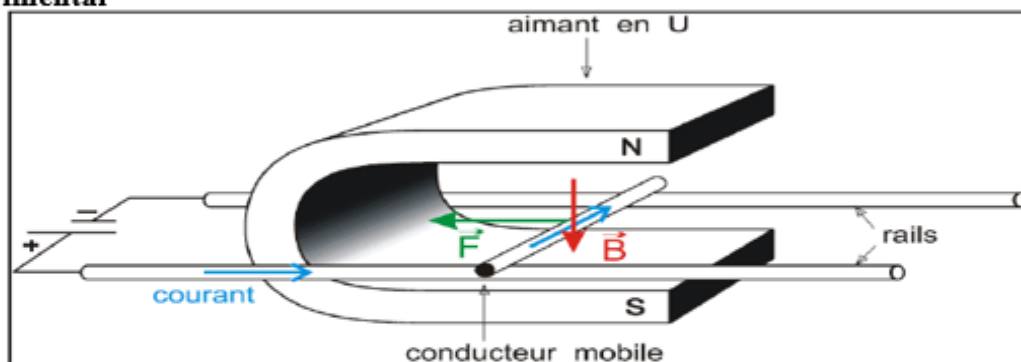
CHAPITRE P 7 : LOI DE LAPLACE

L'ACTION D'UN CHAMP MAGNETIQUE UNIFORME SUR UN COURANT RECTILIGNE :

I.1 Mise en évidence expérimentale

I.1.1 Expérience 1 : les rails de Laplace

-Dispositif expérimental



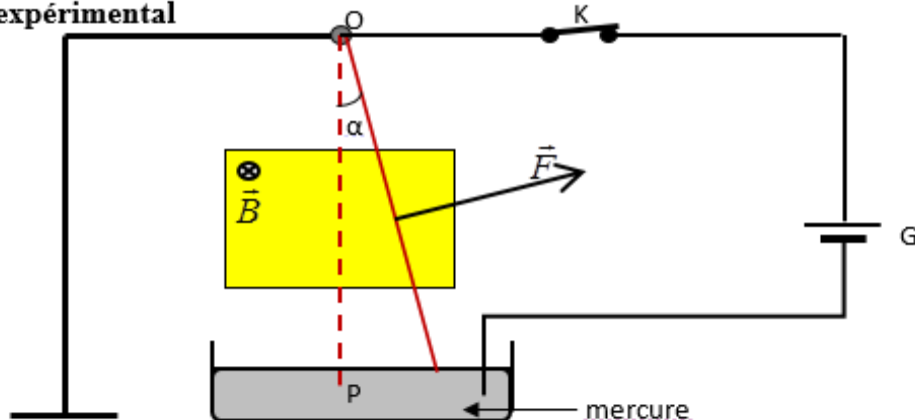
-**Observations :**

Lorsqu'on fait passer un courant, nous constatons que la tige se déplace vers la gauche. De même si on inverse les bornes du générateur la tige se déplace en sens inverse (vers la droite)

-**Conclusion :** la tige est soumise à une force \vec{F} d'origine électrique et magnétique et son sens dépend donc du sens du courant et de celui du vecteur champ magnétique \vec{B} créé par l'aimant.

I.1.2 Expérience 2: Le conducteur pendule

-Dispositif expérimental



OP est un fil conducteur mobile autour de O et dont une portion se trouve dans un domaine où règne un champ magnétique uniforme \vec{B} entrant. L'extrémité P plonge légèrement dans du mercure assurant le contact électrique.

-**Observation** Lorsqu'on fait passer le courant électrique, le conducteur dévie d'un angle α .

-**Conclusion :** La tige est soumise sous l'action d'une force F d'origine électrique et magnétique.

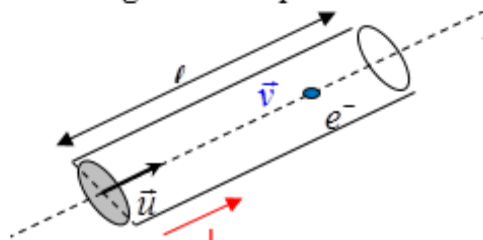
I.2 Loi de Laplace :

I.2.1 Enoncé de la loi de Laplace :

Tout élément de conducteur de longueur l parcouru par un courant d'intensité I et placé dans un champ magnétique uniforme B subit une force appelée force électromagnétique ou force de Laplace.

I.2.2. Interprétation microscopique, expression de la force de Laplace :

Considérons un élément de conducteur de volume \mathcal{V} , de section s et de longueur l parcouru par le courant d'intensité I et placé dans le domaine où règne le champ \vec{B} .



-Posons N le nombre d'électrons contenus dans le volume \mathcal{V} et n le nombre d'électrons par unité de volume ; on a :

$$n = \frac{N}{\mathcal{V}} \Rightarrow N = n\mathcal{V}.$$

-Soit Q la quantité d'électricité traversant la section s pendant le temps t : $Q = Ne = nV_e$ or $V = s \times \ell \Rightarrow Q = n\ell s e$ (1) ;

-Soit I l'intensité du courant parcourant l'élément de conducteur, $I = \frac{Q}{t} = \frac{n\ell s e}{t} = nse \times \frac{\ell}{t}$ avec $\frac{\ell}{t} = v$, vitesse des électrons ; soit $I = nsev$ (2)

D'après Lorentz, sur chaque électron, s'exerce la force magnétique $\vec{f}_m = -e \vec{v} \wedge \vec{B}$. La résultante des forces qui s'exercent sur tous les électrons est: $\vec{F}_m = \sum \vec{f}_m = \sum -e \vec{v} \wedge \vec{B} = (\vec{v} \wedge \vec{B}) \times \sum (-e)$, or $\sum (-e) = -Q \Rightarrow \vec{F}_m = -Q \times \vec{v} \wedge \vec{B}$.

La relation (1) permet d'écrire $\vec{F}_m = -n\ell s e \times \vec{v} \wedge \vec{B}$.

Soit \vec{u} un vecteur unitaire parallèle au conducteur et de même sens que le courant I , on peut écrire : $\vec{\ell} = \ell \cdot \vec{u}$ et $\vec{v} = -v \cdot \vec{u}$; ce qui donne $\vec{F}_m = -n\ell s e \times (-v \cdot \vec{u} \wedge \vec{B}) = nsev \ell \cdot \vec{u} \wedge \vec{B} = nsev \times \vec{\ell} \wedge \vec{B}$.

La relation (2) permet d'écrire: $\vec{F}_m = I \cdot \vec{\ell} \wedge \vec{B}$.

Conclusion : La force de Laplace est donc tout simplement la résultante de toutes les forces magnétiques

s'appliquant sur les électrons de conductivité dans le conducteur. Son expression est donnée par : $\vec{F} = I \cdot \vec{\ell} \wedge \vec{B}$

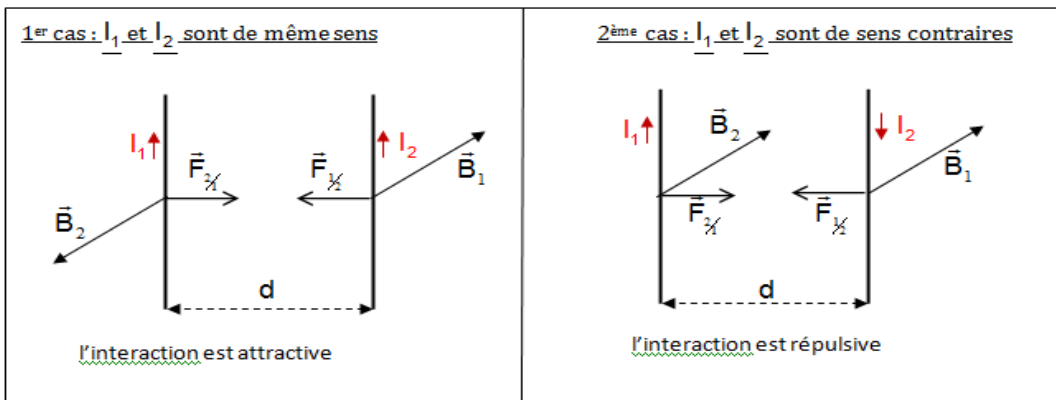
N.B : $\vec{\ell}$ est orienté dans le sens du courant.

I.2.3 Caractéristiques de la force de Laplace :

- direction : perpendiculaire au plan formé par $\vec{\ell}$ et \vec{B} ;
- sens : tel que le trièdre $(\vec{\ell}, \vec{B}, \vec{F})$ soit directe ;
- norme : $\|\vec{F}\| = I\ell B \times \sin(\vec{\ell}, \vec{B})$, si $\vec{\ell} \perp \vec{B}$ alors : $F = BI\ell$

II. Action mutuelle de deux éléments de courant rectiligne :

Soit deux conducteurs parallèles séparés par une distance d et parcourus respectivement par des courants d'intensités I_1 et I_2 .



$$\vec{F}_{\frac{1}{2}} = I_2 \vec{\ell} \wedge \vec{B}_1 ; \vec{F}_{\frac{2}{1}} = I_1 \vec{\ell} \wedge \vec{B}_2$$

Calcul de la norme commune des forces $\vec{F}_{\frac{1}{2}}$ et $\vec{F}_{\frac{2}{1}}$

$$\begin{cases} F_{\frac{1}{2}} = I_2 \times \ell \times B_1 \\ F_{\frac{2}{1}} = I_1 \times \ell \times B_2 \end{cases} \text{ avec } B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{d} \text{ et } B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{d} \Rightarrow \begin{cases} F_{\frac{1}{2}} = I_2 \times \ell \times \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{d} \\ F_{\frac{2}{1}} = I_1 \times \ell \times \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{d} \end{cases} ; \text{ soit}$$

$$F_{\frac{1}{2}} = F_{\frac{2}{1}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\ell}{d} \cdot I_1 I_2$$

Définition de l'ampère

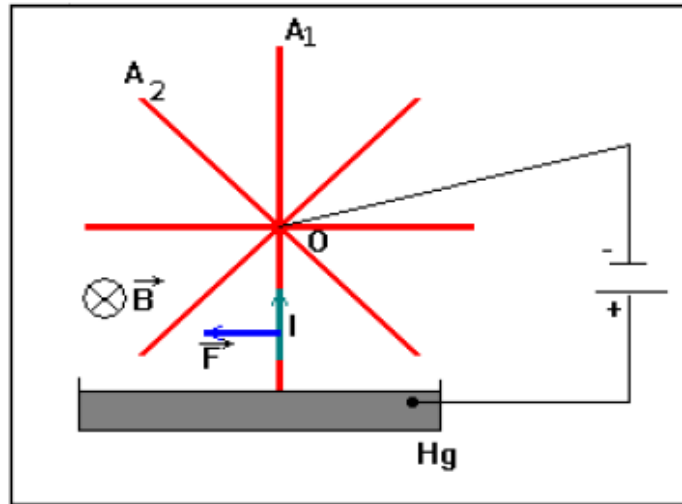
Dans la formule précédente, prenons $d = \ell = 1 \text{ m}$; $I_1 = I_2 = 1 \text{ A} \Rightarrow F_{\frac{1}{2}} = F_{\frac{2}{1}} = \frac{\mu_0}{2\pi} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$.

Par définition, l'**ampèremètre (A)** est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs rectilignes, parallèles, de longueurs infinies, de section circulaire négligeable et placés à une distance de **1 mètre** l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces deux conducteurs une force égale à **$2 \cdot 10^{-7}$ newton** par unité de longueur.

IV. Applications pratiques :

IV.1 La roue de Barlow :

C'est le premier moteur électrodynamique.

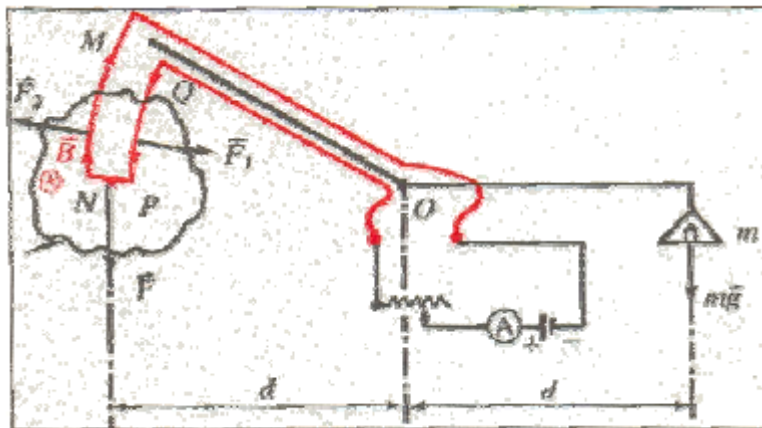


La roue mobile autour de son axe horizontal est reliée à l'une des bornes d'un générateur. Une portion de la roue plonge dans un champ magnétique uniforme \vec{B} . Le mercure assure le contact électrique. Lorsqu'on fait passer un courant, la roue se met à tourner sous l'action de la force de Laplace.

Remarque : Le rendement pratique de ce moteur est très faible.

IV.4 La balance de Cotton

Dispositif :



-En l'absence de courant, la balance est en équilibre sous l'action de son poids \vec{P}_0 et de la réaction \vec{R} du couteau.

-Lorsqu'on fait passer le courant dans le fil OQPNM, la balance dévie sous l'action de la force de Laplace \vec{F} .

-On rétablit l'équilibre en plaçant une masse m dans le plateau.

-Dans le nouvel état d'équilibre,

Compte tenu de la forme des conducteurs MN et PQ (arcs de cercle de centre O), les moments des forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 sont nuls. La condition d'équilibre s'écrit:

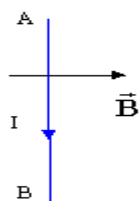
$$\mathcal{M}(\vec{R}) + \mathcal{M}(\vec{P}_0) + \mathcal{M}(\vec{F}) + \mathcal{M}(\vec{F}_1) + \mathcal{M}(\vec{F}_2) + \mathcal{M}(\vec{P}) = 0, \text{ soit } l\ell B d = mgd \text{ d'où } \boxed{B = \frac{mg}{l\ell}}$$

Remarque: la balance de Cotton permet de déterminer l'intensité du champ magnétique

Exercice 1 : Conducteur Rectiligne

Le conducteur rectiligne AB est parcouru par un courant continu et plongé dans le champ magnétique \vec{B}

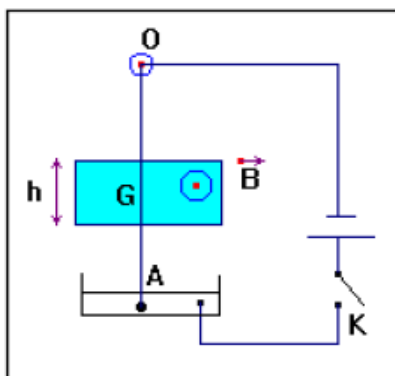
Quels sont la direction et le sens de la force de Laplace à laquelle il est soumis : donner la réponse par une phrase, puis représenter cette force sur le schéma.



Exercice 2

Une tige de cuivre OA, de masse $m=8,3$ g, homogène, de longueur $L=30$ cm, peut se mouvoir dans un plan vertical autour de l'axe Δ perpendiculaire au plan de la figure, passant par O. L'extrémité A plonge dans une cuve à mercure qui assure le contact électrique avec le reste du circuit. Sur une hauteur $h=3$ cm, la partie centrale de la tige est placée dans un champ magnétique \vec{B} uniforme et parallèle à Δ , pointant vers le lecteur.

1. Que se passe-t-il quand l'interrupteur K est ouvert ?
2. Que se passe-t-il quand l'interrupteur est fermé ?
3. Quand $I=10$ A, la tige dévie de $\theta=5^\circ$ et reste en équilibre. Faire le schéma. En déduire la valeur de l'intensité du champ \vec{B} .



FIN

P 08 : INDUCTION MAGNETIQUE – ETUDE D'UN DIPÔLE (R, L).

Introduction :

Au cours des chapitres précédents (**depuis P5**), nous avons vu comment un courant électrique pouvait créer un champ magnétique (**expérience d'Oersted**).

Les scientifiques se sont longtemps demandé si l'inverse était possible, c'est-à-dire est ce qu'un champ magnétique pouvait créer un courant électrique. Des expériences assez précises réalisées par le physicien russe **Heinrich Lenz** lui ont permis de découvrir en 1833 la loi qui porte son nom.

Cette loi est la base du fonctionnement de plusieurs systèmes tel que le dynamo de vélo, les centrales électriques, les régulateurs de courant, les transformateurs, le freinage des camions etc...

I. Etude expérimentale du phénomène d'induction /d'auto-induction

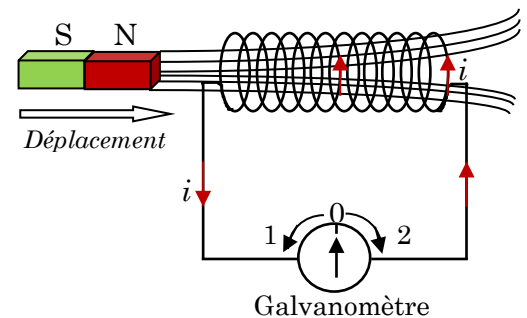
I.1 Mise en évidence du phénomène d'induction

I.1.1) Expérience 1 : Bobine fixe, aimant mobile

Approchons le pôle nord de l'aimant droit à une bobine reliée à un galvanomètre à zéro central.

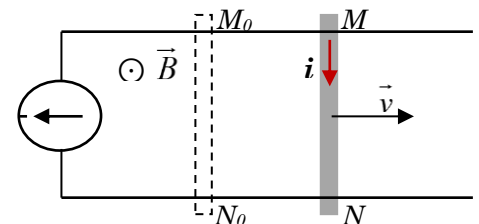
- ✓ L'aiguille du galvanomètre dévie dans le sens 1 et revient à zéro (0) dès que le déplacement cesse.
- ✓ Si on éloigne rapidement l'aimant, le galvanomètre dévie dans le sens 2 (sens inverse).

La déviation de l'aiguille du galvanomètre indique la présence d'un courant dans le circuit dépourvu de générateur appelé courant induit.



I.1.2) Expérience 2 : Rails de Laplace

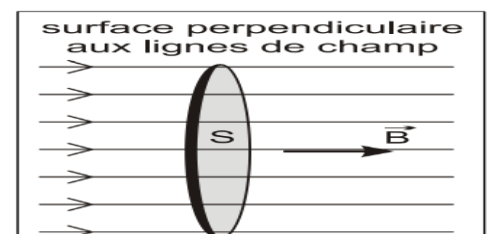
Déplaçons rapidement la tige de cuivre parallèlement à elle-même tout en maintenant le contact avec les rails de Laplace. On constate qu'il y'a circulation du courant (indiqué par l'aiguille du galvanomètre), qui ne dure que la durée du déplacement de la tige.



I.1.3) Interprétation

Le phénomène d'induction électromagnétique se manifeste dans un circuit dès que le nombre de lignes de champ à travers ce circuit varie. Les physiciens ont défini une grandeur physique appelée flux magnétique ou flux d'induction magnétique, souvent noté ϕ , qui est justement une mesure du nombre de lignes de champ passant à travers le circuit. Le flux magnétique ϕ est proportionnel à B et à S par la relation :

$$\phi = N\vec{B} \cdot \vec{S} = N.B.S.\cos\theta$$



Dans l'expérience 1, le déplacement de l'aimant augmente ou diminue le nombre de ligne de champ qui traverse la bobine. Il y'a donc variation du flux magnétique.

Dans l'expérience 2, on fait varier la surface S donc du flux magnétique.

Dans les deux (2) expériences, la circulation du courant induit dans le circuit dépourvu générateur est due à la variation du flux magnétique.

Le phénomène observé est appelé induction magnétique.

- Le circuit dans lequel circule le courant induit est appelé **l'induit**. *Exemple : La bobine ou les rails.*
- La source de champ magnétique est appelée **l'inducteur**. *Exemple : L'aimant.*
-

I.1.4) Conclusion

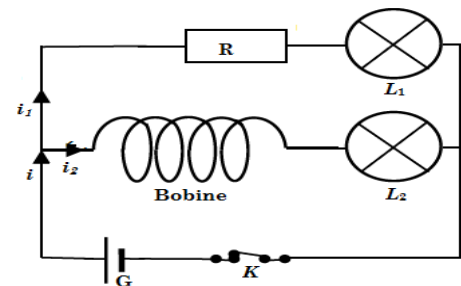
Toute variation du flux magnétique à travers un circuit fermé produit un courant induit dès que commence la variation du flux et disparaît dès que cesse cette variation : la cause et l'effet ont la même durée.

I.2 Mise en évidence du phénomène d'auto-induction

On considère le circuit ci-contre :

I.2.1) Observation :

- ✓ Si on ferme l'interrupteur K , la lampe L_1 s'allume instantanément alors que la lampe L_2 accuse un retard avant de s'allumer.
- ✓ Si on ouvre l'interrupteur K , la lampe L_2 s'éteint après la lampe L_1 .



I.2.2) Interprétation :

La bobine est la cause du retard à l'établissement ou à l'annulation du courant dans la branche CD.

Lorsque l'interrupteur est fermé un courant passe dans la bobine qui fait régner un champ magnétique variable à l'intérieur de la bobine.

Ce champ magnétique crée un flux magnétique propre (ϕ_p) à la bobine, variable, donnant naissance à un courant induit qui s'oppose au courant inducteur d'où le retard observé.

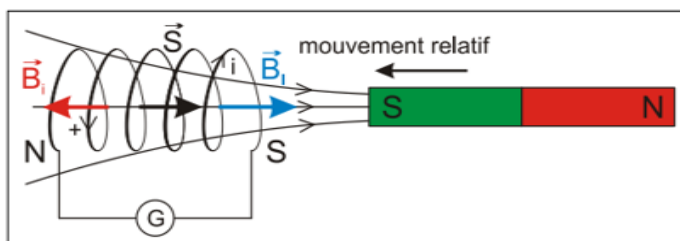
I.2.3) Conclusion :

La bobine joue à la fois le rôle de d'inducteur et d'induit : c'est le phénomène d'auto-induction ou de self-induction.

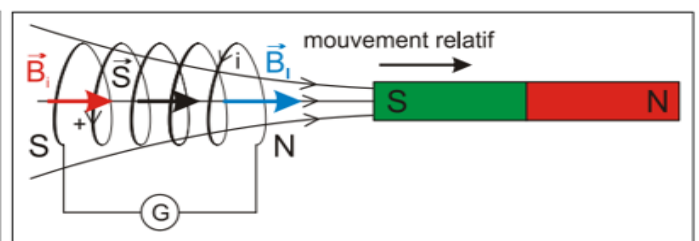
Toute variation du flux propre à travers un circuit engendre dans celui-ci une f.é.m. induite propre.

I.3 Sens du courant induit : Loi de Lenz

I.3-1. Mise en évidence :



Expérience 1



Expérience 2

I.3-2. Observations et interprétation :

- ☞ En approchant le pôle sud, le flux inducteur à travers la bobine augmente à cause de l'augmentation du champ inducteur \vec{B}_1 . Cette variation positive donne naissance à un courant induit d'intensité i créé par un champ induit \vec{B}_i qui s'oppose à \vec{B}_1 (il circule dans le sens négatif)
- ☞ En éloignant le pôle sud, le flux inducteur à travers la bobine diminue à cause de la diminution du champ inducteur \vec{B}_1 . Cette variation négative donne naissance à un courant induit d'intensité i créé par un champ induit \vec{B}_i qui s'oppose à \vec{B}_1 (il circule dans le sens positif).

Le courant induit i crée dans l'induit (la bobine) un champ magnétique induit \vec{B}_i qui s'oppose à la variation du flux $\Delta\phi$ de l'inducteur (l'aimant). Ce champ magnétique engendre un flux induit propre

$$\phi_{ind} : \begin{cases} \Delta\phi > 0 \Rightarrow \phi_{ind} < 0 \\ \Delta\phi < 0 \Rightarrow \phi_{ind} > 0 \end{cases} \Rightarrow \boxed{\phi_{ind} \cdot \Delta\phi < 0}$$

I.3-3. Conclusion

Le courant induit circule dans un sens tel qu'il tente de s'opposer à la variation du flux magnétique inducteur qui lui donne naissance.

I.3-4. Enoncé de la loi de Lenz

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



II. Etude théorique du phénomène d'induction / d'auto-induction

II.1 Phénomène d'induction

II.1.1- Force électromotrice induite

L'apparition du courant dans ces circuits sans générateur montre que ces derniers se comportent comme des générateurs caractérisés une tension appelée force électromotrice f.é.m. notée e .

a) Force électromotrice moyenne

Si pendant une durée Δt la variation du flux est $\Delta\phi$, la f.é.m. moyenne est donné par :

$$\boxed{e_m = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}}$$

b) Force électromotrice instantanée

La f.é.m. instantanée e est par définition : $e = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} e_m = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \right) = -\frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \boxed{e = -\frac{d\phi}{dt}}$

c) Intensité du courant induit

D'après la loi de Pouillet : $i = \frac{\sum e}{\sum r} \Rightarrow \boxed{i = \frac{e}{r} = -\frac{1}{r} \frac{d\phi}{dt}}$

Remarque :

Le signe – traduit la loi de Lenz indiquant le sens inverse du courant induit

☞ Si ϕ augmente, $\frac{d\phi}{dt} > 0 \Rightarrow \begin{cases} e < 0 \\ i < 0 \end{cases}$ alors i est de sens contraire par rapport au sens + choisi,

☞ Si ϕ diminue, $\frac{d\phi}{dt} < 0 \Rightarrow \begin{cases} e > 0 \\ i > 0 \end{cases}$ alors i a même sens que le sens + choisi,

Donc i et e ont toujours le même signe.

d) Quantité d'électricité induite

La quantité d'électricité transportée pendant une durée Δt est :

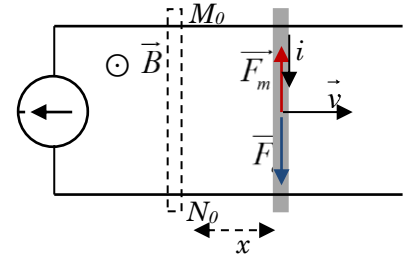
$$i = \frac{q}{\Delta t} \Rightarrow q = i \cdot \Delta t = \frac{1}{r} \frac{|\Delta\phi|}{\Delta t} \cdot \Delta t \Rightarrow \underline{q = \frac{|\Delta\phi|}{r}}$$

II.1.2- Champ électromoteur

Considérons le déplacement de la tige MN sur les rails AA' et CC' .

L'ensemble baigne dans un champ magnétique uniforme \vec{B} .

Les électrons de la tige se déplacent à la même vitesse \vec{v} que la tige et sont donc soumis à une force de Lorentz : $\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$



Sous l'action de cette force, les électrons se dirigent vers M et on note une *d.d.p.* entre M et N d'où l'existence d'un champ électrique appelé champ électromoteur tel que :

$$\vec{F}_e = q\vec{E}_m \Rightarrow q\vec{E}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B} \Rightarrow \underline{\vec{E}_m = \vec{v} \wedge \vec{B}} \Rightarrow \underline{E_m = v \cdot B \cdot \sin(\vec{v}, \vec{B})}$$

Remarque :

Le champ électromoteur et le courant induit i sont toujours dans le même sens.

Expression de e :

Pendant le déplacement, la tige reçoit du travail mécanique qu'elle fournit au circuit sous forme de travail électrique. Elle se comporte donc comme un générateur dont la f.é.m. est :

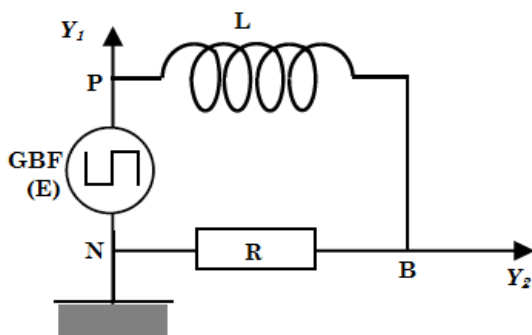
$$e = \frac{W_{N \rightarrow M}(\vec{F})}{q} = \frac{\vec{F} \cdot \overline{NM}}{q} = \frac{q\vec{E}_m \cdot \overline{NM}}{q} = \vec{E}_m \cdot \overline{NM} = \|\vec{E}_m\| \cdot \|\overline{NM}\| \cdot \cos(\vec{E}_m, \overline{NM}) = E_m \cdot \ell \cdot \cos \pi = -E_m \cdot \ell$$

$$\Rightarrow \underline{e = -B \cdot \ell \cdot v}$$

Autre méthode :

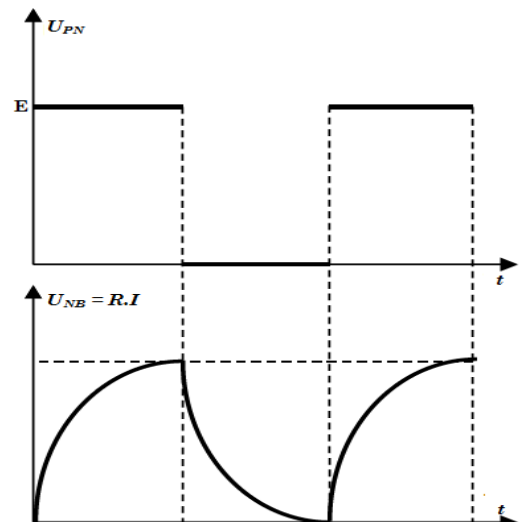
A l'instant $t = 0$, $\phi_0 = B \cdot S_0$ A l'instant $t \neq 0$, $\phi(t) = B \cdot S = B \cdot (S_0 + x\ell) = B \cdot S_0 + B \cdot \ell \cdot x = \phi_0 + B \cdot \ell \cdot x$

La f.é.m. induite est : $e = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\phi_0 + B \cdot \ell \cdot x) = -\frac{d\phi_0}{dt} - B \cdot \ell \frac{dx}{dt} = -B \cdot \ell \cdot v \Rightarrow \underline{e = -B \cdot \ell \cdot v}$

II.2 Phénomène d'auto-induction**II.2.1 Visualisation à l'oscilloscope**

On utilise un oscilloscope pour visualiser les tensions.

- La voie Y_1 permet de visualiser la tension du GBF,
- La voie Y_2 visualise la tension aux bornes du résistor $U_R = R \cdot I$. Cette voie montre au coefficient R près la variation de l'intensité i .



II.2.2 Flux propre et inductance

Le flux propre à travers la bobine est :

$$\phi_p = N \vec{B} \cdot \vec{S} = NB.S \quad \text{or} \quad \begin{cases} B = \mu_0 \frac{N.i}{l} \\ S = \pi.r^2 \end{cases} \Rightarrow \boxed{\phi_p = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot N^2}{l} \cdot i = L \cdot i} \quad \text{avec} \quad \boxed{L = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot N^2}{l}}$$

Le flux propre est proportionnel à l'intensité i du courant.

Le coefficient de proportionnalité appelé inductance ou self inductance L ne dépend que des caractéristiques physiques de la bobine (longueur, nombre de spires, rayon).

Dans le S.I, l'inductance s'exprime en henry (symbole H).

III. Etude d'un dipôle (R, L)

III.1) - Tension aux bornes d'une bobine

III.1-1. Expression de la f.é.m. d'auto-induction

Lorsque l'intensité du courant i varie, le dipôle est le siège d'une f.é.m. induite e donnée par :

$$\boxed{e = -\frac{d\phi_p}{dt} = -L \cdot \frac{di}{dt}}$$

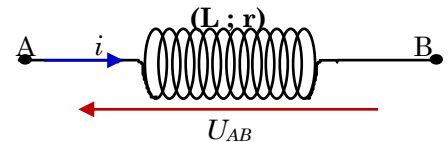
Remarque :

- En courant continu, l'auto-induction n'existe qu'à la fermeture ou à l'ouverture du circuit,
- En courant variable, le phénomène d'auto-induction existe toujours.

III.1-2. Loi d'ohm généralisé

Considérons une bobine d'inductance L et de résistance interne r : elle est dite bobine résistive.

$$\text{On a : } u_{AB} = u_L = ri - e = ri - \left(-L \frac{di}{dt}\right) \Rightarrow \boxed{u_L = ri + L \frac{di}{dt}}$$



☞ Si $r \ll 0 \Rightarrow u_L = L \frac{di}{dt}$: La bobine est purement inductive,

☞ En régime continu : $i = cste \Rightarrow \frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow u_L = ri$ la bobine se comporte comme un résistor,

☞ Si i varie très rapidement, $L \frac{di}{dt}$ prend des valeurs très élevées : il y a phénomène de surtension.

III.2) - Energie magnétique emmagasinée

III.2-1. Echange énergétique

La puissance électrique instantanée échangée par une bobine placée dans un circuit est :

$$\mathcal{P} = u_L \cdot i = \left(ri + L \frac{di}{dt}\right) \cdot i \Rightarrow \boxed{\mathcal{P} = r \cdot i^2 + L \cdot i \cdot \frac{di}{dt}}$$

☞ $\mathcal{P}_j = r \cdot i^2$ appelée puissance joule est la puissance dissipée sous forme de chaleur,

☞ $\mathcal{P}_m = L \cdot i \cdot \frac{di}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right)$ est la puissance magnétique

✓ Si $\mathcal{P}_m > 0$; $|i| \square$ (croît) la bobine reçoit de l'énergie : elle se comporte comme un récepteur,

✓ Si $\mathcal{P}_m < 0$; $|i| \square$ (décroit) la bobine cède de l'énergie : elle se comporte comme un générateur.

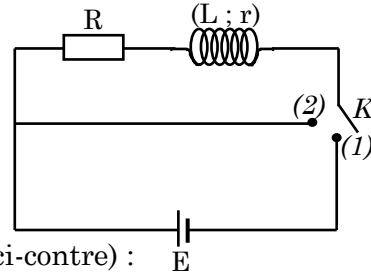
III.2-2. Energie emmagasinée

$$\text{On a : } \mathcal{P}_m = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) = \frac{dE_m}{dt} \Rightarrow \underline{E_m = \frac{1}{2} L i^2}$$

L'énergie emmagasinée par une bobine d'inductance L parcourue par un courant i est : $E_m = \frac{1}{2} L i^2$

III.3) - Etablissement et annulation du courant

Considérons le circuit ci-contre :



III.3-1. Etablissement du courant

A $t = 0$, basculons l'interrupteur K à la position (1) (circuit ci-contre) :

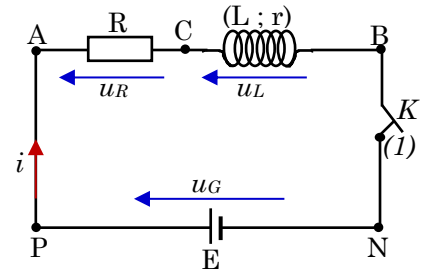
Equation différentielle qui régit i :

La loi d'additivité des tensions donne :

$$u_{AC} + u_{CB} = u_{PN} \Rightarrow u_R + u_L = u_G \Rightarrow Ri + \left(ri + L \frac{di}{dt} \right) = E$$

$$L \frac{di}{dt} + (R+r) \cdot i = E \Rightarrow \underline{\frac{di}{dt} + \frac{(R+r)}{L} \cdot i = \frac{E}{L}} \quad \text{Equation différentielle du}$$

1^{e} ordre avec second membre.



Expression i en fonction du temps $i = f(t)$:

L'équation différentielle admet comme solution :

$$i(t) = i_1 + i_2 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} i_1 \text{ la solution de l'équation différentielle sans second membre } \left(\frac{di}{dt} + \frac{R+r}{L} \cdot i = 0 \right) \\ i_2 \text{ la solution particulière de l'équation différentielle avec second membre} \end{cases}$$

✓ Calcul de i_1 : $\frac{di}{dt} + \frac{R+r}{L} \cdot i = 0 \Rightarrow \frac{di}{i} = -\frac{R+r}{L} \cdot dt \Rightarrow \int \frac{di}{i} = -\frac{R+r}{L} \cdot \int dt$

$$\Rightarrow \ln i_1 = -\frac{R+r}{L} \cdot t + \text{cste} \quad \text{En posant } \underline{\tau = \frac{L}{R+r}} \Rightarrow \underline{i_1 = ke^{-\frac{t}{\tau}}}$$

✓ Calcul de i_2 : $i_2 = \text{cste} \Rightarrow \frac{di_2}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{R+r}{L} \cdot i_2 = \frac{E}{L} \Rightarrow \underline{i_2 = \frac{E}{R+r}}$

La solution de l'équation différentielle est : $i(t) = i_1 + i_2 = ke^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R+r}$

✓ Détermination de la constante k : A $t=0$; $i=0 \Rightarrow ke^0 + \frac{E}{R+r} = 0 \Rightarrow k = -\frac{E}{R+r}$

$$\text{D'où } \underline{i(t) = \frac{E}{R+r} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)}$$

Autre méthode : Rappel mathématique

La solution de l'équation différentielle $ay' + by = c$ est de la forme : $y = ke^{-\frac{b}{a}x} + \frac{c}{b}$

Par comparaison : $\begin{cases} a = L \\ b = R+r \\ c = E \end{cases} \Rightarrow i(t) = ke^{-\frac{R+r}{L}t} + \frac{E}{R+r} = ke^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R+r} \quad \text{Avec } \tau = \frac{L}{R+r}$

$$A \quad t=0 ; i=0 \Rightarrow ke^0 + \frac{E}{R+r} = 0 \Rightarrow k = -\frac{E}{R+r} \Rightarrow \boxed{i(t) = \frac{E}{R+r} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)}$$

Remarque : Quand $t \rightarrow \infty \Rightarrow i(t) = I_0 = \frac{E}{R+r}$: c'est le régime permanent.

☞ Constante de temps τ :

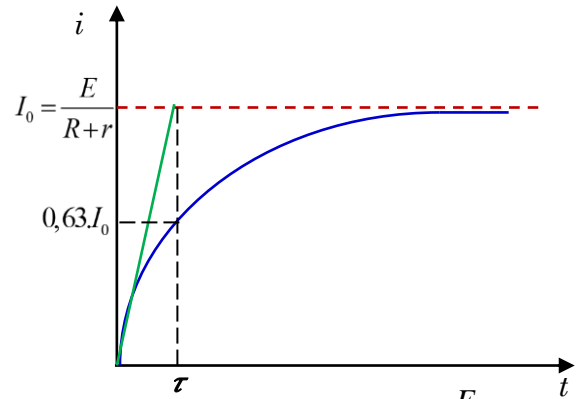
La constante $\tau = \frac{L}{R+r}$ appelée constante de temps du circuit caractérise la durée de l'établissement du courant.

$$A \quad t = \tau ; i(\tau) = \frac{E}{R+r} (1 - e^{-1}) = (1 - 0,37) \frac{E}{R+r} = 0,63I_0$$

A l'établissement du courant, τ est le temps au bout duquel l'intensité du courant vaut 63% de sa valeur maximale (I_0).

Remarque :

Graphiquement, τ est l'intersection de la tangente à $t = 0$ avec l'asymptote d'équation $i = I_0 = \frac{E}{R+r}$.



III.3-2. Annulation (ou rupture) du courant

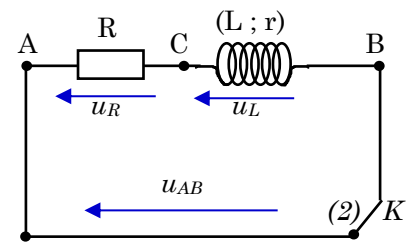
Basculons l'interrupteur vers la position 2 (circuit ci-contre) :

☞ Equation différentielle :

La loi d'additivité des tensions donne :

$$u_{AC} + u_{CB} = u_{AB} \Rightarrow u_R + u_L = 0 \Rightarrow Ri + \left(ri + L \frac{di}{dt}\right) = 0$$

$$L \frac{di}{dt} + (R+r).i = 0 \Rightarrow \boxed{\frac{di}{dt} + \frac{(R+r)}{L}.i = 0} \quad \text{Equation différentielle du 1^{er} ordre sans second membre.}$$



☞ Expression i en fonction du temps $i = f(t)$:

L'équation différentielle admet comme solution : $i(t) = ke^{-\frac{t}{\tau}}$ Avec $\tau = \frac{L}{R+r}$

$$A \quad t=0 ; i = I_0 = \frac{E}{R+r} \Rightarrow k = \frac{E}{R+r} \Rightarrow \boxed{i(t) = \frac{E}{R+r} e^{-\frac{t}{\tau}} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}}$$

Remarque : Quand $t \rightarrow \infty \Rightarrow i(t) = 0$: c'est le régime permanent.

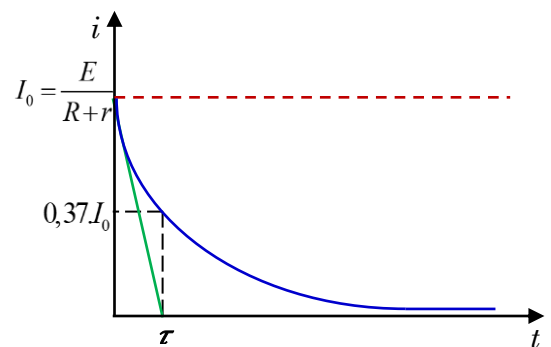
☞ Constante de temps τ :

$$A \quad t = \tau ; i(\tau) = I_0 e^{-1} = 0,37I_0$$

A l'annulation du courant, τ est le temps au bout duquel l'intensité du courant atteint 37% de sa valeur maximale.

Graphiquement, τ est l'intersection de la tangente à $t = 0$ avec l'axe des abscisses.

Remarque : On a : $\tau = \frac{L}{R+r}$ donc,



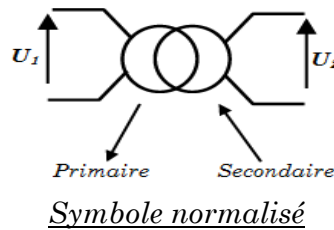
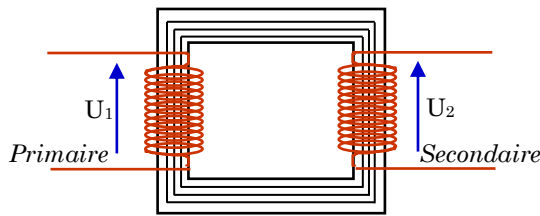
✓ La constante de temps τ est grande si la résistance totale du circuit est petite ou si L est grand.

✓ Plus τ est grand, plus la durée du régime transitoire est importante et plus τ est petit plus cette durée est petite.

IV. Applications pratiques

IV.1) - Transformateur

Un transformateur est un quadripôle (appareil à 4 pôles) qui comporte deux bobines enroulées sur un noyau de fer de section constante.



Lorsqu'on fait passer un courant variable dans le primaire, il existe alors un champ magnétique en tout point du noyau de fer. On note ainsi une variation du flux au niveau secondaire.

Les tensions efficaces sont liées par : $\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} = k$ k est appelé rapport de transformation.

☞ Si $k > 1 \Rightarrow \begin{cases} U_2 > U_1 \\ N_2 > N_1 \end{cases}$ le transformateur est élévateur de tension (ou survolteur)

☞ Si $k < 1 \Rightarrow \begin{cases} U_2 < U_1 \\ N_2 < N_1 \end{cases}$ le transformateur est abaisseur de tension (ou sous-volteur)

☞ Si $k = 1 \Rightarrow \begin{cases} U_2 = U_1 \\ N_2 = N_1 \end{cases}$ le transformateur est dit idéal.

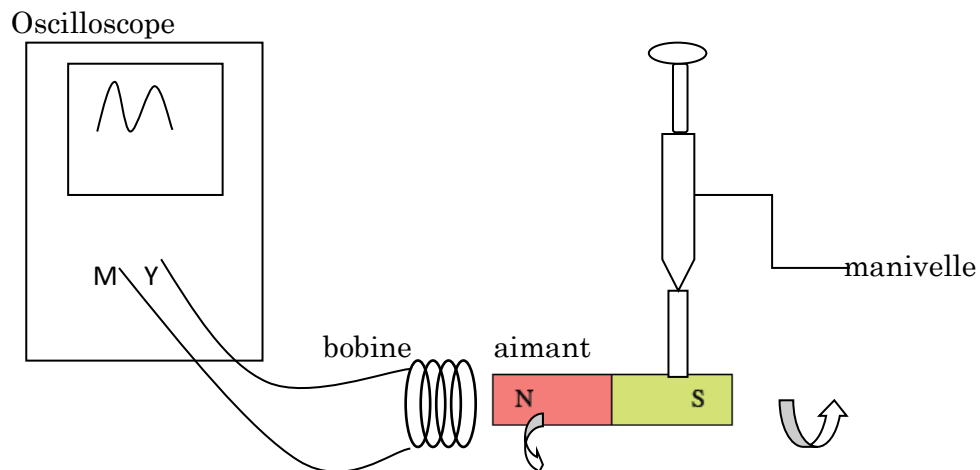
☞ Le rendement du transformateur est ; $\rho = \frac{P_{2m}}{P_{1m}} = \frac{k_2 U_2 I_2}{k_1 U_1 I_1}$

Remarque : Un transformateur ne fonctionne pas en courant continu, il fonctionne en courant variable. Si le transformateur est idéal (parfait) alors $P_{1m} = P_{2m}$

IV.2) - Alternateur :

Un alternateur est constitué d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor).

☞ On fait tourner un aimant devant une bobine fixe dont les bornes sont reliées à un oscilloscope :



L'alternateur convertit l'énergie mécanique due au mouvement du rotor (aimant) en énergie électrique variable dans le stator (bobine) : c'est le phénomène d'induction.

☞ La puissance moyenne de l'alternateur est : $P_m = k U_i$; où k = facteur de puissance ($0 \leq k \leq 1$)

Exemple : Une bobine rectangulaire de côtés $a = 6$ cm et $b = 10$ cm et comportant $N = 50$ spires est mobile autour d'un axe fixe (Δ) passant par les milieux des petits côtés. La bobine placée dans un champ magnétique \vec{B} horizontal d'intensité $B = 0,1$ T tourne avec une vitesse constante de 40 tours/s

A la date $t = 0$, les vecteurs surface \vec{S} et \vec{B} ont même direction et même sens.

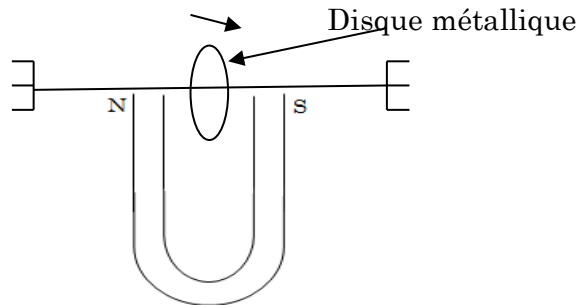
Exprimer à une date t le flux à travers la bobine. En déduire l'expression de la f.é.m. induite.

$$\phi = N\vec{B}\cdot\vec{S} = N.B.S.\cos\theta = N.B.ab.\cos\theta \quad \text{Or M.C.U} \Rightarrow \theta = \omega t + \theta_0 = \omega t \quad \text{car} \quad \theta_0 = (\vec{B}, \vec{S})_{t=0} = 0$$

$$\text{D'où : } \phi = N.B.ab.\cos(\omega t) = 3.10^2 \cos(80\pi t) \Rightarrow e = -\frac{d\phi}{dt} = 7,54 \sin(80\pi t)$$

IV.3) Les courants de Foucault

IV.3.1 Mise en évidence



En plaçant un disque métallique en rotation dans l'entrefer d'un aimant en U, il freine.

IV.3.2 Interprétation :

Le flux magnétique variable au cours du temps est responsable de l'apparition d'un courant induit à l'intérieur du disque. Le courant induit crée des forces de Laplace qui s'opposent au déplacement du disque, d'où l'effet de freinage observé.

IV.3.3 Définition :

On appelle courant de Foucault, le courant induit créé dans un disque métallique. On l'utilise dans certains systèmes de freinages comme les ralentisseurs de camion.

IV.3.4 Phénomène de surtension :

Les étincelles qu'on observe à l'ouverture et à la fermeture d'un circuit comportant une bobine sont dues à un phénomène de surtension : c'est l'effet d'auto-induction de la bobine.

CHAPITRE P 9 : ETUDE D'UN DIPOLE (R, C)

I. Condensateur

1. Définition et représentation symbolique

Un condensateur est formé de deux conducteurs métalliques appelés armatures séparés par un isolant (diélectrique).

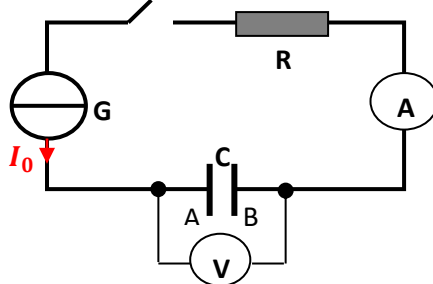
Le condensateur est représenté symboliquement par :



2. Relation entre charge et tension dans un condensateur : Capacité

Pour établir la relation entre q et u on charge à courant constant le dispositif ci-dessous, constitué d'un condensateur associé en série avec un conducteur ohmique.

a. Dispositif expérimental

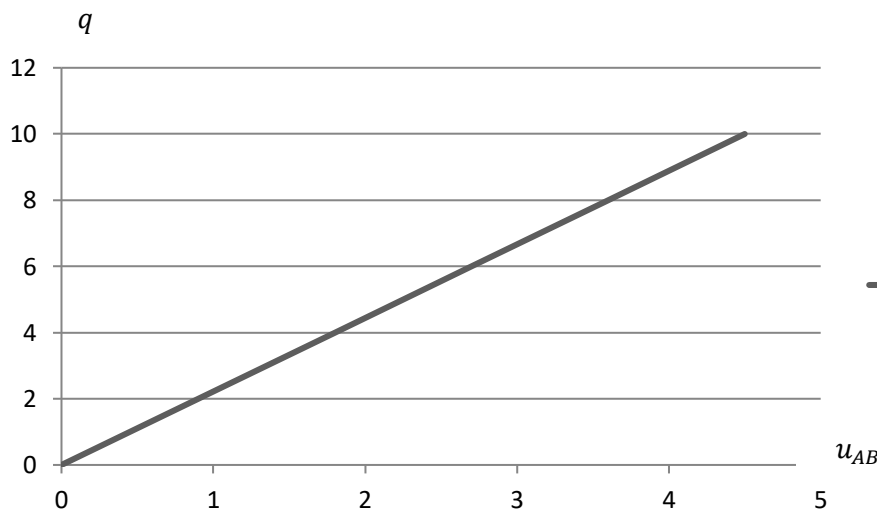


La valeur de l'intensité I_0 étant fixé à 0,1 mA. On ferme l'interrupteur et on déclenche simultanément un chronomètre. Les valeurs de u_{AB} sont relevées toutes les 20 secondes.

b. Résultats

$t(s)$	0	20	40	60	80	100
$u_{AB}(V)$	0	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5
$q_A(mC)$	0	2	4	6	8	10

c. Tracé de la courbe $q = f(u_{AB})$



Le tracé de la courbe $q = f(u_{AB})$ donne une droite linéaire donc de la forme: $q = Ku_{AB}$

Pour un condensateur donné le rapport $\frac{q}{u_{AB}}$ est constant. Ce rapport caractérise le condensateur, on l'appelle la capacité du condensateur. La capacité du condensateur représente l'aptitude du condensateur à stocker ou à emmagasiner des charges électriques.

On notera $\frac{q}{u_{AB}} = C$ d'où : $q = Cu_{AB}$

• Unités

Dans le système international la capacité est exprimée en farads (F).

La valeur de la capacité est généralement indiquée par le constructeur. Cette valeur dépend :

- ✓ De la forme du condensateur
- ✓ De la nature du milieu diélectrique
- ✓ De l'épaisseur du diélectrique

- Capacité d'un condensateur plan

Dans le cas d'un condensateur plan, nous admettrons que la capacité est donnée par la relation.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{e}$$

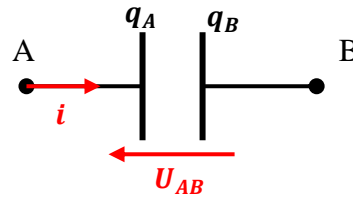
e est l'épaisseur du diélectrique ; S est la surface en regard ; ϵ_0 est appelée permittivité du vide, sa valeur est :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{34. \pi . 10^9} \text{ SI}$$

ϵ_r : est la permittivité du diélectrique.

3. Relation entre la charge électrique et l'intensité du courant

Soit A et B les deux armature du condensateur, q_A la charge de l'armature A, $q_B = -q_A$ la charge de l'armature B.



Le sens de parcours du courant étant défini, on aura donc :

$$i = \frac{dq_A}{dt} = - \frac{dq_B}{dt}$$

Conséquence : Relation intensité-tension

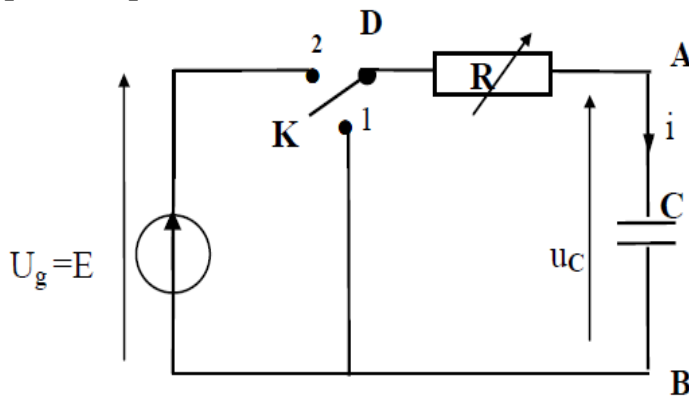
En remplaçant l'expression : $q = Cu_{AB}$ dans la relation précédente, il vient :

$$i = \frac{d(Cu_{AB})}{dt} = C \frac{du_{AB}}{dt}$$

II. Etude d'un dipôle (R, C)

1. Etude expérimentale

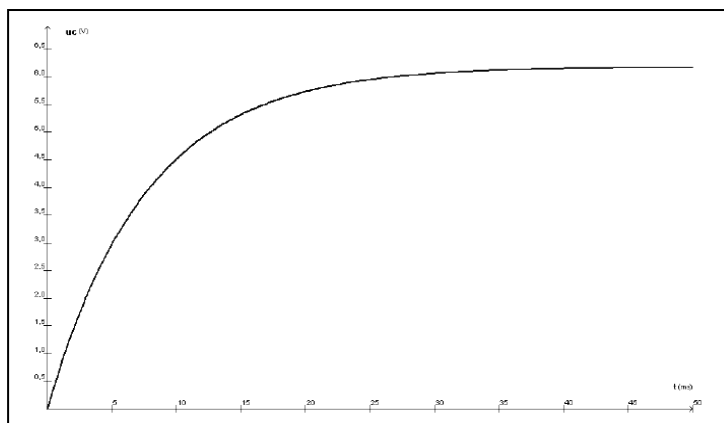
- Dispositif expérimental



a. Charge du condensateur

Lorsque l'interrupteur K est placé en position 2, le condensateur se charge, sa tension croît plus ou moins rapidement (régime transitoire) pour atteindre la valeur de la tension imposée par le générateur $U_g = E$, l'intensité du courant s'annule (régime permanent).

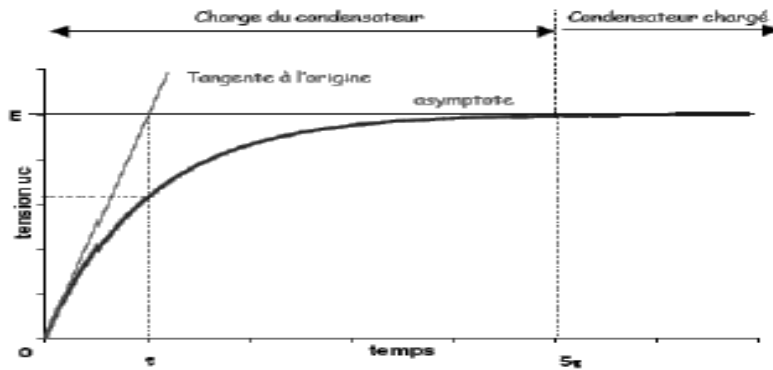
- Courbe de charge



- **Détermination expérimental de τ**

- Méthode de la tangente à l'origine

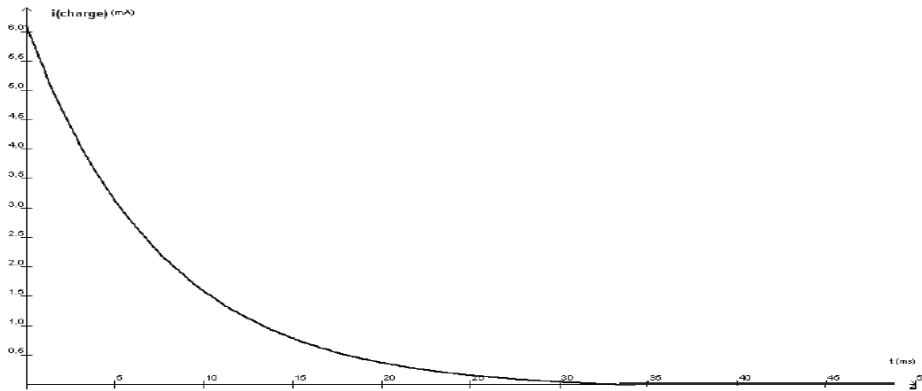
Méthode des 63% : τ temps correspondant à $U_C = 0.63 E$



b. Décharge du condensateur

Lorsque l'interrupteur K est placé en position 1, le condensateur se décharge à travers la résistance, sa tension décroît plus ou moins rapidement (régime transitoire) jusqu'à atteindre la valeur de tension $U_C = 0$, l'intensité du courant s'annule (régime permanent).

- Courbe de décharge



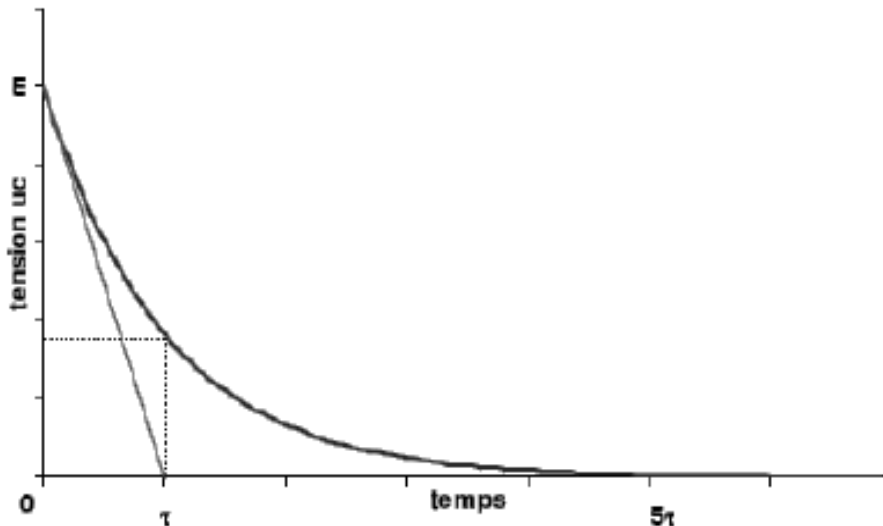
- Facteur influençant la charge du condensateur : constante de temps τ

Comme pour la charge, la décharge aussi est influencée par les mêmes paramètres (R et C).

La durée $\tau = R.C$ est caractéristique de l'évolution du système. Elle donne un ordre de grandeur du temps que met la tension $U_C = E$ pour atteindre la valeur 0 : c'est la constante de temps.

- Détermination expérimental de τ

- Méthode de la tangente à l'origine
- Méthode des 37% : τ temps correspondant à $U_C = 0.37 E$



2. Etude théorique

a. Charge du condensateur

- Equation différentielle régissant la charge du condensateur

D'après la loi d'additivité des tensions on a :

$$E = U_C + U_R = U_C + Ri = U_C + R \frac{dq}{dt}$$

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}$$

Finalement l'équation différentielle cherchée est :

$$\mathbf{E = U_C + RC \frac{dU_C}{dt}} \quad \text{avec } \tau = \mathbf{RC}$$

- Solution de l'équation différentielle

L'équation différentielle $E = U_C + RC \frac{dU_C}{dt}$ est vérifiée par $U_C = A e^{\frac{-t}{\tau}} + B$

En effet $\frac{dU_C}{dt} = \frac{-1}{\tau} A e^{\frac{-t}{\tau}}$

$$E = A e^{\frac{-t}{\tau}} + B + RC \left(\frac{-1}{\tau} A e^{\frac{-t}{\tau}} \right) \quad E = A e^{\frac{-t}{\tau}} \left(1 - \frac{RC}{\tau} \right) + B$$

Cette équation est vérifiée quel que soit la date t si $B = E$ et $1 - \frac{RC}{\tau} = 0 \Rightarrow \tau = RC$

(Car B et E sont des constantes et $e^{\frac{-t}{\tau}}$ est variable, il faut donc annuler $1 - \frac{RC}{\tau}$ et alors B=E)

On a donc $U_C = A e^{\frac{-t}{RC}} + E$

Pour déterminer A on utilise la valeur de U_C à l'instant $t = 0s$

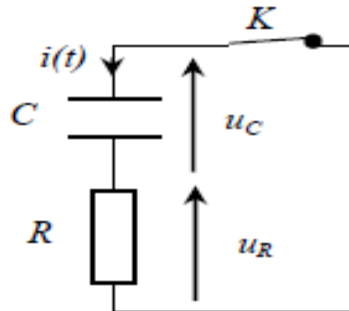
A $t = 0s, U_C = 0$ alors $0 = A + E \Rightarrow A = -E$

La solution de l'équation différentielle lors de la charge est :

$$U_C = -E e^{\frac{-t}{RC}} + E = E(1 - e^{\frac{-t}{RC}}) \quad \mathbf{U_C = E(1 - e^{\frac{-t}{RC}})}$$

b. Décharge du condensateur

- Equation différentielle régissant la décharge du condensateur



D'après la loi d'additivité des tensions on a : $U_C + U_R = 0$

Loi d'ohm pour la résistance $U_R = Ri$ $i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}$

Finalement l'équation différentielle recherchée est : $\mathbf{RC \frac{du_C}{dt} + U_C = 0}$

- Solution de l'équation différentielle

On cherche à définir la fonction : $U_C = A e^{\frac{-t}{\tau}} + B$ (où A, B et τ sont des constantes) solution de l'équation différentielle.

En effet $\frac{dU_C}{dt} = \frac{-1}{\tau} A e^{\frac{-t}{\tau}}$

L'équation différentielle donne : $A e^{\frac{-t}{\tau}} + B + RC \left(\frac{-1}{\tau} A e^{\frac{-t}{\tau}} \right) = 0 \quad A e^{\frac{-t}{\tau}} \left(1 - \frac{RC}{\tau} \right) + B = 0$

Cette équation est vérifiée quel que soit la date t si : $B = 0$ et $1 - \frac{RC}{\tau} = 0 \Rightarrow \tau = RC$ On a donc $U_C = A e^{\frac{-t}{RC}}$

Pour déterminer A on utilise la valeur de U_C à l'instant $t = 0s$

A $t = 0s, U_C = E$ alors $A = E$

La solution de l'équation différentielle lors de la décharge est : $\mathbf{U_C = -E e^{\frac{-t}{RC}}}$

3. Etude de l'intensité dans chaque phase

On peut faire la même démarche que précédemment en cherchant l'intensité :

Dans les deux cas (charge ou décharge), d'après la loi d'Ohm on a : $i = u_R / R$

* Cas de la charge : $U_R = E - U_C$; $i = (E - U_C) / R = (E - E + E \cdot e^{-t/RC}) / R$ $i = (E / R) \cdot e^{-t/RC}$

L'intensité du courant de charge décroît au cours de la charge, de la valeur $i_0 = E / R$ à une valeur proche de 0.

Plus la phase de charge avance plus il est difficile de charger le condensateur.

* Cas de la décharge : $U_R = -U_C$; $i = -U_C / R = -E \cdot e^{-t/RC} / R$

Le courant circule dans le sens négatif et croît de la valeur $i_0 = -E / R$ à une valeur proche de 0.

III. Energie emmagasinée dans un condensateur

Un condensateur de capacité C est chargé par un générateur de f.é.m. E à travers un résistor de protection. On ferme l'interrupteur à la date $t = 0$.

La charge finale du condensateur est $Q = CE$

On se propose de déterminer l'énergie stockée par

le condensateur pendant la charge. A une date t soit q la charge du condensateur i l'intensité du courant U_C la tension aux bornes du condensateur

La puissance instantanée du condensateur est:

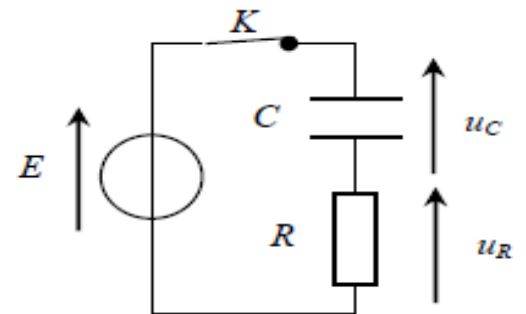
$$p = U_C i = \frac{q}{C} i = \frac{q}{C} \frac{dq}{dt}$$

L'énergie échangée par le condensateur entre la date t et une date très

rapprochée $t + dt$ est $dW = p dt = \frac{q}{C} \frac{dq}{dt} dt = \frac{q}{C} dq$

L'énergie stockée au cours de la charge s'obtient par intégration $W = \int_0^q \frac{1}{C} q dq = \frac{Q^2}{2C}$

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CE^2}{2}$$



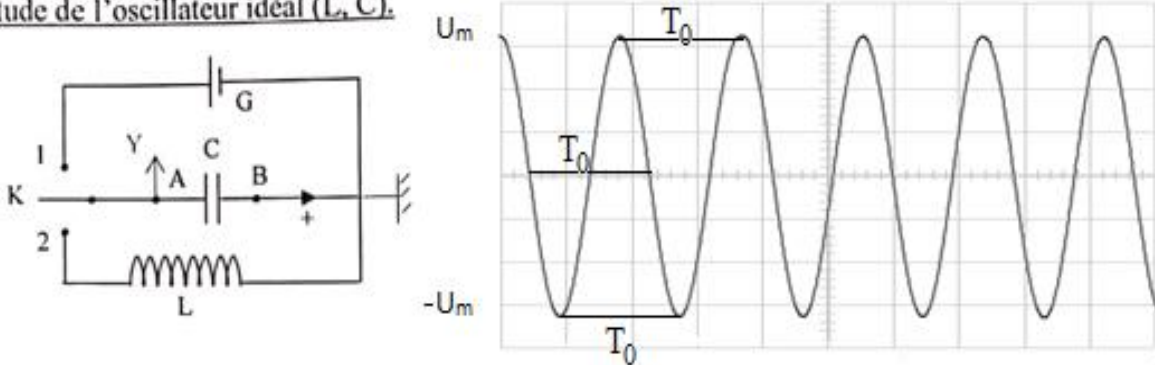
FIN

CHAPITRE 12: OSCILLATIONS ELECTRIQUES LIBRES ET AMORTIES

I- Oscillations électriques libres

Un oscillateur électrique est constitué d'une bobine et d'un condensateur. Un oscillateur est dit libre si une fois excité, il est abandonné à lui-même, les oscillations sont alors dites libres.

I-1- Etude de l'oscillateur idéal (L, C).



Lorsque l'interrupteur K est placé sur la position 1, le générateur G charge le condensateur (excite l'oscillateur LC) qui reçoit une charge Q_0 et possède l'énergie $E_0 = \frac{1}{2} \frac{Q_0^2}{C}$. A la fin de la charge, la charge du condensateur est : $q = Q_0 > 0$.
Lorsque K bascule en 2, on observe sur l'écran de l'oscillographe une tension U_{AB} sinusoïdale.

a) Equation du circuit (LC) K en 2

Loi des mailles : $U_{AB} + U_{BA} = 0$; avec $U_{AB} = q/C$ pour le condensateur orienté de A vers B et pour la bobine orientée de B vers A, $U_{BA} = r.i + L.di/dt = L.di/dt$ car $r=0$.

Equation du circuit: $\frac{q}{C} + L \frac{di}{dt} = 0$, $i = dq/dt$ et en divisant par L $\rightarrow \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{LC} = 0$ ou $\ddot{q} + \omega_0^2 q = 0$,
avec $\omega_0^2 = 1/LC$

Remarque: sachant que $q = C.u$, avec $u = U_{AB}$, l'équation peut aussi s'écrire: $\ddot{u} + \omega_0^2 u = 0$.

La solution est de la forme : $q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$

Le condensateur est le siège de charges et de décharges successives.

$\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ est la pulsation propre de l'oscillateur, $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$ et $N_0 = 1/T_0$ sont respectivement la période et la fréquence propres.

On obtient pour la tension $u = q/C$, $u = u_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$

Pour l'intensité $i = dq/dt$, $i = -\omega_0 q_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$ ou $i = I_m \cos(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2})$

La tension et le courant sont alternatifs, de même période T_0 . $I_m = q_m \cdot \omega_0$ est l'amplitude du courant. L'intensité est en avance de $\pi/2$ sur la tension, on dit aussi qu'elle est en quadrature avance sur u.

b) Graphes de q(t) et i(t).

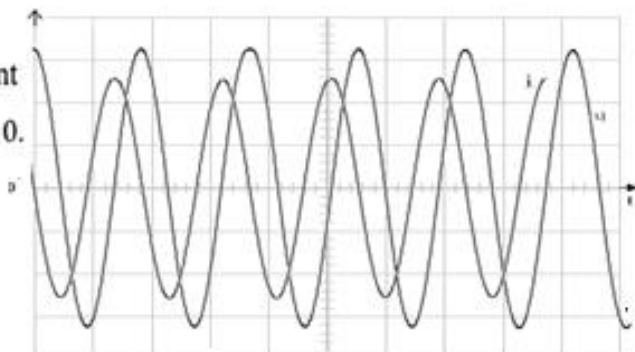
Choisissons, par exemple comme instant $t = 0$, l'instant où K bascule en 2, $q = Q_0$ et $i = 0 \rightarrow q_m = Q_0$ et $\varphi = 0$.

On obtient:

$$q(t) = Q_0 \cos \omega_0 t$$

$$i(t) = Q_0 \omega_0 \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{2})$$

et



I-2- Etude énergétique de l'oscillateur LC.

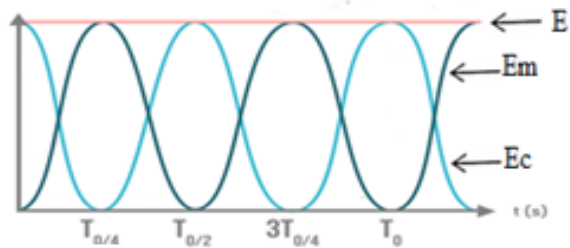
A chaque instant t l'énergie de l'oscillateur est : $E = E_c + E_m$.

$$E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} Li^2 = \frac{q_m^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t + \varphi) + \frac{LI_m^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi)$$

$$E = \frac{q_m^2}{4C} [1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi)] + \frac{LI_m^2}{4} [1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi)]$$

Avec $L = \frac{1}{C\omega_0^2}$ et $I_m = \omega_0 q_m$, on obtient :

$$E_m = \frac{q_m^2}{4C} [1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi)]$$



L'énergie totale est donc constante et égale à l'énergie du condensateur lors de l'excitation: E_c et E_m sont sinusoïdales et périodiques, de période $T = T_0/2$ et de pulsation $\omega = 2\omega_0$.

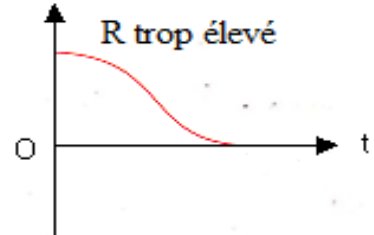
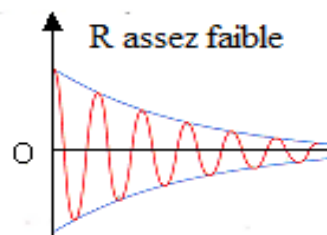
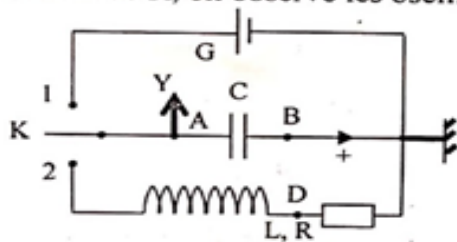
$$E = \frac{q_m^2}{4C} + \frac{q_m^2}{4C} \Rightarrow E = \frac{Q_0^2}{2C}$$

$$E = \frac{Q_0^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}, \text{ cette énergie pourrait être portée initialement par la bobine par excitation.}$$

On obtient les graphes ci-dessus, en choisissant les mêmes conditions initiales que précédemment.

II- Oscillations amorties

Lorsque la bobine est résistive (de résistance R) ou lorsque le circuit LC est en série avec un résistor de résistance R , on observe les oscillogrammes suivants selon la valeur de R :



Pour R assez faible, on a des oscillations pseudo périodiques, de période T légèrement supérieure à T_0 . Pour R trop élevé, on a un régime aperiodique, la tension s'annule lentement sans oscillations.

Le régime critique correspond à une valeur qui permet à la tension de s'annuler rapidement.

Equation du circuit :

Loi des mailles : $U_{AB} + U_{BD} + U_{DA} = 0$, soit $\frac{q}{C} + Ri + L \frac{di}{dt} = 0$ ou $\boxed{\frac{q}{LC} + \frac{R}{L} \dot{q} + \ddot{q} = 0}$

A chaque instant l'énergie du circuit est : $E = E_c + E_m = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} Li^2$

Et $\frac{dE}{dt} = \frac{dq}{dt} \frac{q}{C} + \frac{di}{dt} Li = \left(\frac{q}{C} + L \frac{di}{dt} \right) \frac{dq}{dt}$

La loi des mailles donne $\frac{q}{C} + L \frac{di}{dt} = -Ri$

Donc : $\frac{dE}{dt} = -Ri^2 \rightarrow dE/dt < 0$; l'énergie totale du circuit diminue, par effet joule la partie résistive s'échauffe et dissipe de l'énergie à l'extérieur du circuit.

L'énergie dissipée pendant dt est $\boxed{dE = -R \cdot i^2 \cdot dt}$

III- Analogies entre grandeurs électriques et grandeurs mécaniques

Oscillateur mécanique : $v = \frac{dx}{dt}$ x $E_c = \frac{1}{2} mv^2$ m $E_p = \frac{1}{2} kx^2$ k

Oscillateur électrique : $i = \frac{dq}{dt}$ q $E_m = \frac{1}{2} Li^2$ L $E_c = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$ $1/C$

CHAPITRE 13: OSCILLATIONS ELECTRIQUES FORCEES

I- Courant alternatif sinusoïdal

I-1- Définition

Un courant alternatif sinusoïdal est un courant dont l'intensité i est une fonction sinusoïdale du temps :

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi)$$

I-2- Courant et tension efficaces : I et U

L'intensité efficace d'un courant alternatif est égale à l'intensité I d'un courant continu, qui passant dans le même conducteur ohmique, y produirait le même dégagement d'énergie par effet joule.

Soit un conducteur ohmique de résistance R .

- lorsqu'il est parcouru par un courant $i = I_m \cos \omega t$ pendant une durée dt , l'énergie dissipée par effet

$$\text{joule est } dW = R \cdot i^2 dt = R I_m^2 \cos^2 \omega t \cdot dt = \frac{R I_m^2}{2} (1 + \cos 2\omega t) dt$$

$$\text{Pendant une période } T = 2\pi/\omega, \text{ l'énergie dissipée est } W = \int_0^T \frac{1}{2} R I_m^2 dt + \int_0^T \frac{1}{2} R I_m^2 \cos 2\omega t dt = \frac{R I_m^2}{2} T$$

- lorsqu'il est parcouru par un courant continu d'intensité I pendant T , l'énergie dissipée par effet joule est $W = R \cdot I^2 \cdot T$.

$$\text{D'après la définition ci-dessus : } R I^2 T = \frac{R I_m^2}{2} \rightarrow I = I_{\text{eff}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

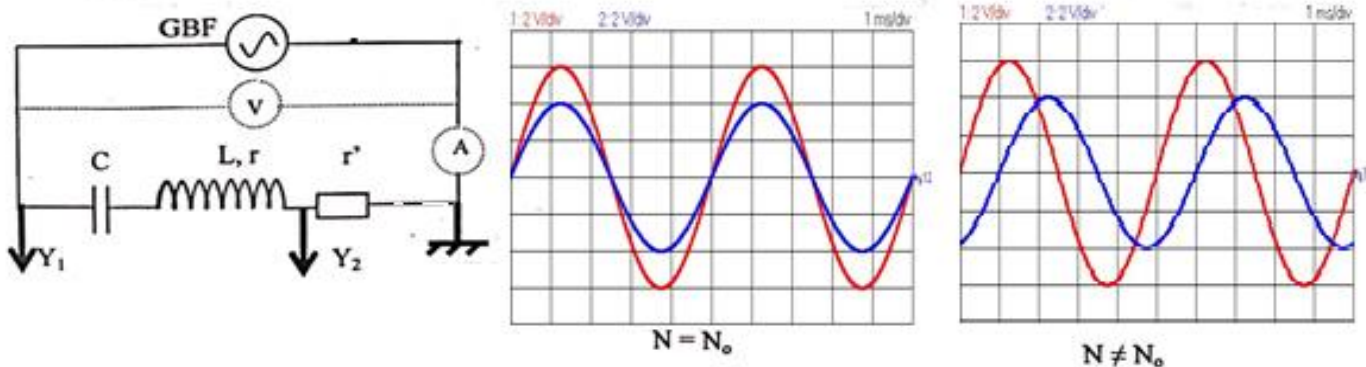
$$\text{De même la tension efficace d'une tension sinusoïdale } u = U_m \cos \omega t \text{ est } U = U_{\text{eff}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

Les ampèremètres et les voltmètres usuels mesurent les valeurs efficaces du courant et de la tension.

II- Etude expérimentale d'un oscillateur RLC série soumis à une excitation sinusoïdale

II-1- Dispositif expérimental

Il comporte, en série, un GBF (générateur de basse fréquence), un condensateur de capacité C , une bobine de résistance r et d'inductance L et un résistor de résistance r' . Le GBF impose aux bornes de l'oscillateur LRC une tension $u = U_m \cos(\omega t + \varphi_1)$ de fréquence N et de pulsation ω , on dit que les oscillations sont forcées. Pour visualiser la tension aux bornes du GBF (donc aux bornes de l'oscillateur LRC) et l'intensité du courant qui parcourt le circuit, on peut lui adjoindre un oscillographe bicourbe. L'ampèremètre et le voltmètre permettent de mesurer U et I .



II-2- Oscillogrammes observés

Ils montrent que i est sinusoïdal comme u et de même période, mais déphasé par rapport à lui (i peut donc s'écrire $i = I_m \cos(\omega t + \varphi_2)$), sauf quand $\omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$, $N = N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, on dit dans ce cas

qu'il y a résonance d'intensité. Le déphasage de u sur i est $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$; $\varphi = \pm \frac{2\pi \cdot \tau}{T}$, τ est le déphasage temporel.

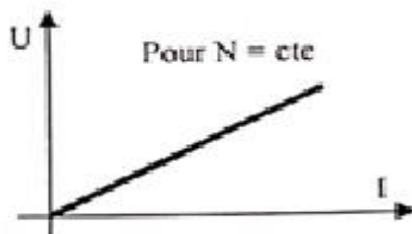
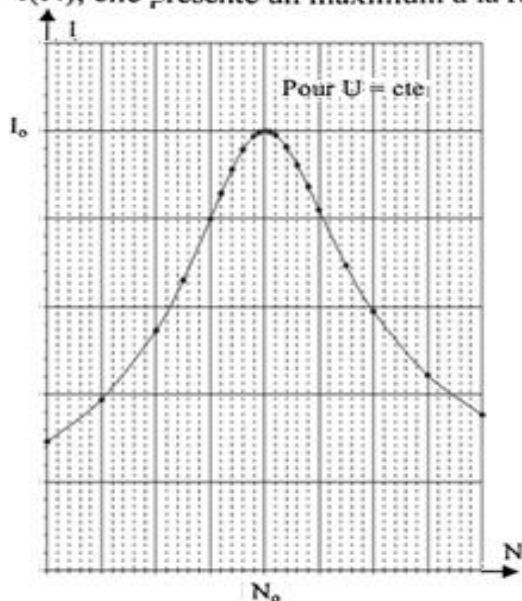
Si d et D sont les longueurs correspondant à τ et T , le déphasage peut s'écrire $\varphi = \pm 2\pi d/D$

Le déphasage de i sur u est $\varphi' = \varphi_2 - \varphi_1$.

En règle générale, en se déplaçant de gauche à droite sur l'écran, la grandeur qui est en avance sur l'autre est celle qui passe la première par son maximum (ou coupe la première l'origine de l'axe des tensions).

II-3- Courbe de réponse $I = f(\omega)$ ou $I = f(N)$

En faisant varier la fréquence ou la pulsation tout en maintenant U constant, on obtient la courbe de réponse $I = f(N)$; elle présente un maximum à la résonance d'intensité, pour $N = N_0$.



II-4- Impédance du circuit Z

A fréquence constante, on montre que U est une fonction linéaire de I , $U = Z.I$ ou $U_m = Z.I_m$, la constante Z est l'impédance du circuit LRC, elle s'exprime en ohm dans le SI.

Pour déterminer Z avec les oscillogrammes, on détermine U_m puis $U_{r'm}$ à partir desquels on obtient I_m

$$= U_{r'm}/r' \text{ et } Z = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_m}{U_{r'm}} r'$$

II-5- Résonance d'intensité

A la résonance d'intensité :

- la fréquence de la tension excitatrice est égale à la fréquence propre du circuit $N = N_0$.
- l'amplitude de l'intensité et sa valeur efficace sont maximales.
- l'intensité et la tension excitatrice sont en phase.

III- Etude théorique du circuit RLC en régime sinusoïdal forcé

$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi_2)$ et $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_1)$. Si l'on choisit comme instant origine $t=0$, un instant où la phase de i est nulle ($\omega \cdot 0 + \varphi_2 = 0 \rightarrow \varphi_2 = 0$), alors le déphasage de u sur i est $\varphi = \varphi_1$.

Les deux grandeurs s'écrivent: $i(t) = I_m \cos \omega t$ et $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi)$

Cela revient aussi à écrire : $u(t) = U_m \cos \omega t$ et $i(t) = I_m \cos(\omega t - \varphi)$

Ou encore $i(t) = I_m \sin \omega t$ et $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$

III-1- Equation du circuit

Loi d'additivité des tensions : $u = u_c + u_b + u_r$. Soit $u = \frac{q}{C} + r.i + L \frac{di}{dt} + r'.i$, équation du circuit.

$i = \frac{dq}{dt}$ et $L \frac{di}{dt} = L \frac{d^2q}{dt^2}$, on pose $R = r + r'$.

L'équation devient: $u = \frac{q}{C} + R.i + L \frac{di}{dt}$ ou $u = \frac{q}{C} + R \frac{dq}{dt} + L \frac{d^2q}{dt^2}$

$$q = \int_0^t i dt, \text{ si } q = 0, \text{ à } t = 0; q = \int_0^t I_m \cos \omega t \cdot dt = \left[\frac{I_m}{\omega} \sin \omega t \right]_0^t = \frac{I_m}{\omega} \sin \omega t = \frac{I_m}{\omega} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$L \frac{di}{dt} = -L I_m \omega \sin \omega t = L I_m \omega \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$u = U_m \cos(\omega t + \varphi)$$

L'équation peut s'écrire : $U_m \cos(\omega t + \varphi) = R I_m \cos \omega t + L I_m \omega \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) + \frac{I_m}{C \omega} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$

Sachant que $U_m = \sqrt{2}.U$ et $I_m = \sqrt{2}.I$, on obtient aussi :

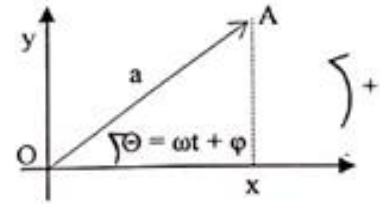
$$U \cos(\omega t + \varphi) = R I \cos \omega t + L I \omega \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) + \frac{I}{C \omega} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

III-2-Résolution de l'équation par construction de Fresnel

a) Représentation d'une grandeur sinusoïdale par un vecteur tournant

Soient $x = a \cdot \cos(\omega t + \varphi)$, une grandeur sinusoïdale et $O\vec{A}$ un vecteur tel que $OA = a$. Si $O\vec{A}$ tourne autour de O dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) avec la vitesse angulaire ω , alors $(\vec{i}, O\vec{A}) = \theta = \omega t + \varphi$ et la projection de $O\vec{A}$ sur Ox a pour valeur $x = a \cdot \cos(\omega t + \varphi)$.

Donc à toute grandeur sinusoïdale de pulsation ω on peut faire correspondre un vecteur tournant à la vitesse angulaire ω .



b) Résolution par de l'équation

Faisons correspondre à chaque fonction de l'équation un vecteur dont la norme est égale à l'amplitude et dont l'angle avec Ox est égal à la phase de la fonction considérée.

Tous les vecteurs tournent avec la même vitesse angulaire ω , leurs écarts angulaires restent inchangés à chaque instant t, on peut donc restreindre la construction de Fresnel à l'instant $t = 0$.

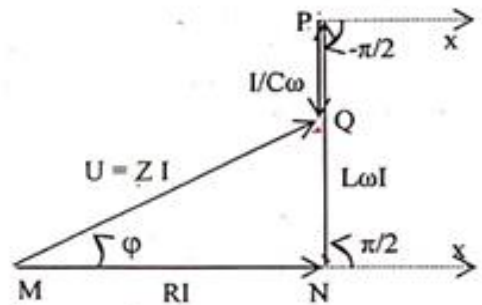
$$M\vec{Q}(U, \varphi) = M\vec{N}(RI, 0) + N\vec{P}(L\omega, \frac{\pi}{2}) + P\vec{Q}(\frac{I}{C\omega}, -\frac{\pi}{2})$$

$$U^2 = (RI)^2 + (L\omega I - \frac{I}{C\omega})^2 \rightarrow U^{\#} = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2} \cdot I$$

Donc $U = Z \cdot I$, avec $Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$, impédance du circuit.

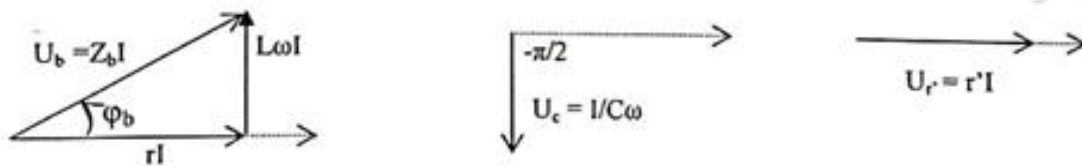
$$\text{tg} \varphi = \frac{L\omega I - I/C\omega}{RI} \rightarrow \text{tg} \varphi = \frac{L\omega - 1/C\omega}{R}$$

$$\cos \varphi = \frac{RI}{ZI} = \frac{R}{Z} \text{ et } \sin \varphi = \frac{L\omega I - I/C\omega}{ZI} = \frac{L\omega - 1/C\omega}{Z} \rightarrow \cos \varphi = \frac{R}{Z} \text{ et } \sin \varphi = \frac{L\omega - 1/C\omega}{Z}$$



- Si $L\omega > 1/C\omega$, $\text{tg} \varphi > 0$, $\varphi > 0$, u est en avance sur i, l'effet inductif l'emporte, $\omega^2 > 1/LC$, $\omega > \omega_0$.
- Si $L\omega < 1/C\omega$, $\text{tg} \varphi < 0$, $\varphi < 0$, u est en retard sur i, l'effet capacitif l'emporte, $\omega^2 < 1/LC$, $\omega < \omega_0$.
- Si $L\omega = 1/C\omega$, $\text{tg} \varphi = 0$, $\varphi = 0$, u et i sont en phase les deux effets se compensent $\omega^2 = 1/LC$, $\omega = \omega_0$.

Remarques :



-pour la bobine, $u_b = U_{bm} \cos(\omega t + \varphi_b) = rI + L \frac{di}{dt}$, φ_b toujours > 0 , le déphasage de u_b par rapport à i.

$$U_b \cos(\omega t + \varphi_b) = rI \cos \omega t + LI\omega \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$U_b = \sqrt{r^2 + (L\omega)^2} \cdot I = Z_b I$, $Z_b = \sqrt{r^2 + (L\omega)^2}$ est l'impédance de la bobine, elle augmente avec ω .

$$\cos \varphi_b = \frac{rI}{Z_b I} = \frac{r}{Z_b} \quad \sin \varphi_b = \frac{L\omega I}{Z_b I} = \frac{L\omega}{Z_b} \quad \text{tg} \varphi_b = \frac{L\omega}{r} ; \cos \varphi_b = \frac{r}{Z_b} \text{ et } \sin \varphi_b = \frac{L\omega}{Z_b}$$

-pour le condensateur, $u_c = \frac{q}{C} = \frac{I_m}{C\omega} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$ est en quadrature retard sur i, $U_c = I/C\omega = Z_c \cdot I$.

$Z_c = 1/C\omega$ est l'impédance du condensateur

-pour le résistor : $u_r = r \cdot I_m \cdot \cos \omega t$, est toujours en phase avec i, $U_r = r \cdot I = Z_r \cdot I$, $Z_r = r$ =cte.

III-3- Courbe de réponse $I = f(\omega)$ et expressions théoriques associées

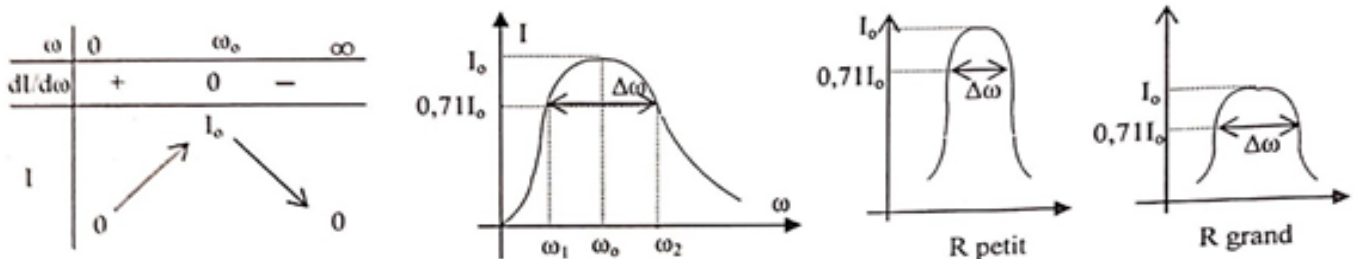
a) Courbe de réponse

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}}, \text{ pour } U \text{ fixé } I = f(\omega), \text{ définie pour } \omega \in]0, \infty[$$

Remarque : un courant continu serait bloqué par le condensateur, et on obtiendrait $I = 0$.

$$\frac{dI}{d\omega} = -U \left[R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2 \right]^{-3/2} (L + \frac{1}{C\omega^2}) \cdot (L\omega - \frac{1}{C\omega}) = 0, \text{ si } L\omega = 1/C\omega \rightarrow \omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Dans ce cas $Z = R$ et $I = I_0 = U/R$ est maximale, de même $I_m = \sqrt{2}I = U_m/R$ est maximale.



b) Bande passante

On appelle bande passante l'intervalle de fréquence ΔN ou de pulsation $\Delta\omega$ pour lequel $I \geq I_0/\sqrt{2}$.

$$\text{Posons } I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \rightarrow \frac{U}{\sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}} = \frac{U}{R\sqrt{2}}$$

On obtient: $(L\omega - \frac{1}{C\omega})^2 = R^2$, il y a deux solutions :

$$(1) : (L\omega - \frac{1}{C\omega}) = -R \rightarrow LC\omega^2 + CR\omega - 1 = 0, \text{ de solution } \omega_1 = \frac{-CR + \sqrt{(CR)^2 + 4LC}}{2LC}$$

$$(2) : (L\omega - \frac{1}{C\omega}) = R \rightarrow LC\omega^2 - CR\omega - 1 = 0, \text{ de solution } \omega_2 = \frac{CR + \sqrt{(CR)^2 + 4LC}}{2LC}$$

$$\text{La bande passante est } \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \rightarrow \Delta\omega = \frac{R}{L} \text{ et } \Delta N = \frac{\Delta\omega}{2\pi} \rightarrow \Delta N = \frac{R}{2\pi L}$$

c) Facteur de qualité

$$\text{Il est défini par le rapport : } Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \text{ ou } Q = \frac{N_0}{\Delta N}. \text{ Soit } Q = \frac{L\omega_0}{R}$$

$$\text{Avec } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{ on montre que } Q = \frac{L}{R\sqrt{LC}} \rightarrow Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\text{Avec } L = \frac{1}{C\omega_0^2}, \text{ on arrive à } Q = \frac{1}{RC\omega_0}$$

d) Acuité de la résonance

- si R est grand, la bande passante est large, à la résonance $I = I_0 = U/R$ est petit, la résonance est dite floue.

- si R est petit, la bande passante est petite, le circuit est dit sélectif. A la résonance $I = I_0 = U/R$ est grand, la résonance est dite aigue.

e) Surtension aux bornes de la bobine et du condensateur à la résonance

$$U_c = Z_c \cdot I_0 \rightarrow U_c = I_0 / C \cdot \omega_0 = U / RC\omega_0 = Q \cdot U$$

$$U_b = Z_b \cdot I_0 = \sqrt{r^2 + (L\omega_0)^2} \cdot I_0. \text{ Si la bobine est pure, } r = 0 \text{ et } U_b = L\omega_0 I_0 = L\omega_0 U / R = Q \cdot U$$

Si $Q > 1$, U_b et U_c sont supérieurs à U ; on dit qu'il y a surtension. La surtension peut être à l'origine d'accidents graves : étincelles sur la bobine et claquage du condensateur.

IV- Puissance en régime sinusoïdal forcé

IV-1- Puissance instantanée d'un dipôle RLC série. Puissance apparente et facteur de puissance

Soit un dipôle, formé d'un circuit RLC série, parcouru par un courant sinusoïdal $i(t) = I_m \cos \omega t$, quand la tension à ses bornes est $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi)$. La puissance instantanée échangée par le dipôle est : $P(t) = u.i = \sqrt{2}.I \cos \omega t . \sqrt{2}.U \cos(\omega t + \varphi) = 2UI \cos(\omega t + \varphi) . \cos \omega t$

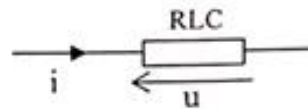
$$P(t) = UI [\cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi]$$

C'est une fonction sinusoïdale de pulsation $\omega' = 2\omega$ et de période $T' = T/2$, qui varie autour de la valeur moyenne $UI \cos \varphi$.

Le produit $P_a = UI$ est appelé puissance apparente.

Dans le SI la puissance apparente s'exprime en volt.ampère(V.A).

On appelle facteur de puissance : $\cos \varphi$



IV-2- Puissance moyenne échangée pendant une période T

L'énergie échangée par le dipôle pendant une durée T correspondant à la période est :

$$E = \int_0^T P(t) dt = \int_0^T UI \cos \varphi . dt + \int_0^T UI \cos(2\omega t + \varphi) . dt = UI \cos \varphi . T$$

La puissance moyenne échangée pendant la durée T est : $P_m = E/T \rightarrow P_m = UI \cos \varphi$

Une durée Δt très grande devant T peut s'écrire : $\Delta t = nT + \varepsilon$ et l'énergie échangée pendant cette durée est $E = n T . P_m$.

IV-3- Puissance moyenne en fonction de la résistance du circuit

Pour un circuit RLC, $\cos \varphi = R/Z \rightarrow P_m = UI . R/Z$, mais $Z = U/I \rightarrow P_m = RI^2$.

Toute l'énergie consommée dans le circuit est absorbée par la partie résistive puis cédée au milieu extérieur par effet joule sous forme de chaleur.

Pour une bobine pure $\varphi_b = \pi/2$, la puissance moyenne pendant T, est $P_m = U_b . I . \cos(\pi/2) = 0$.

Pour un condensateur $\varphi_c = -\pi/2$, la puissance moyenne pendant T, est $P_m = U_b . I . \cos(-\pi/2) = 0$.

Pour le résistor, $\varphi_r = 0$, $P_m = U_r . I . \cos(0) = r' . I^2$.

Remarque : Pour une installation électrique donnée, la puissance moyenne consommée est :

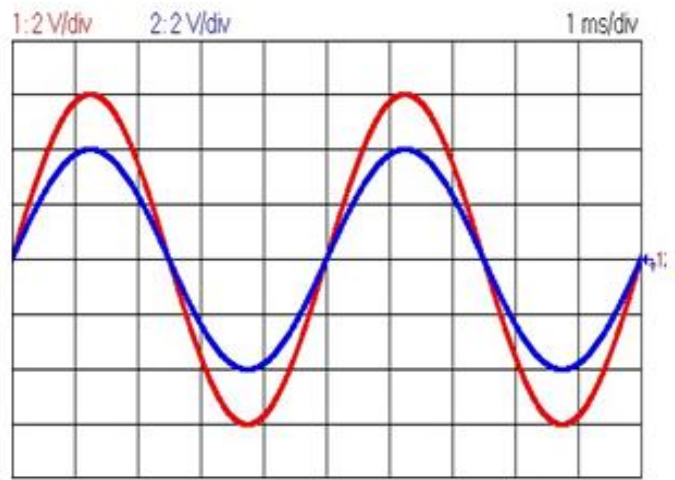
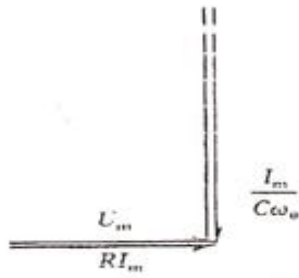
$$P_m = UI \cos \varphi \rightarrow I = \frac{P_m}{U . \cos \varphi}$$

La puissance P_j perdue par effet joule dans les lignes (de résistance R_o) qui amènent le courant jusqu'à

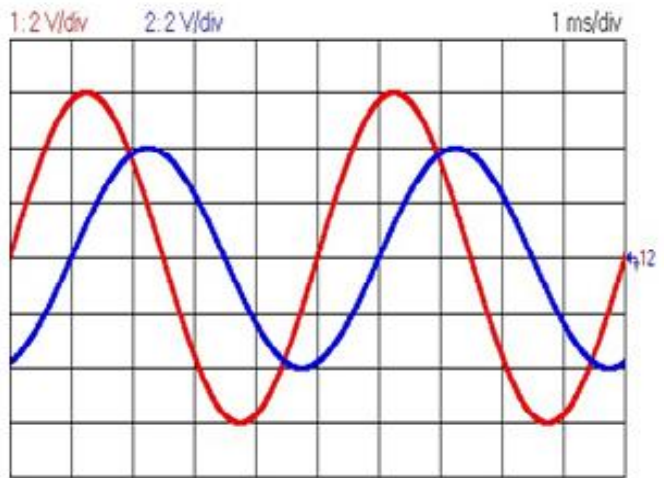
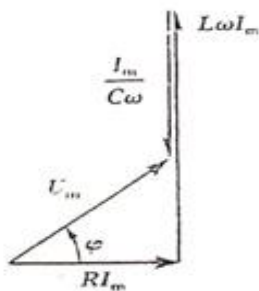
$$\text{l'installation est : } P_j = R_o . I^2 = R_o \frac{P_m^2}{U^2 . \cos^2 \varphi}$$

Pour minimiser les pertes par effet joule pendant le transport, il faut diminuer R_o et augmenter U; donc il faut transporter le courant par des fils peu résistifs (de gros fils pour élever la section et donc baisser R_o) et sous haute tension.

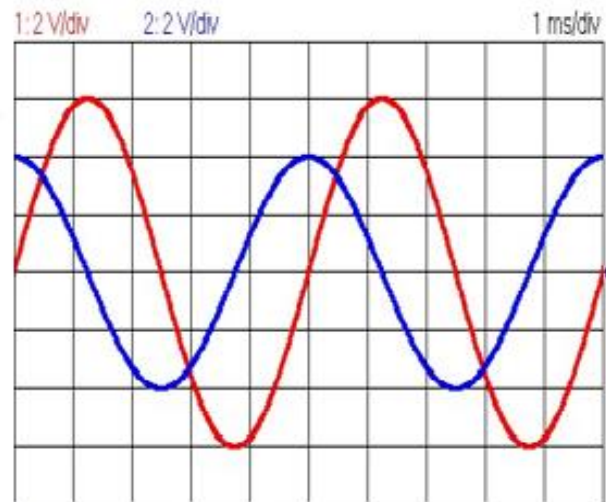
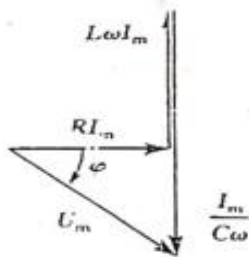
On rappelle que la résistance d'un fil métallique, de longueur l et de section S, vaut: $R = \frac{\rho l}{S}$, où la constante ρ appelée résistivité du métal (en $\Omega.m$), caractérise sa nature.



Les effets de capacité et d'inductance se compensent: $\varphi=0$ et $\omega=\omega_0$: c'est la résonance d'intensité. La tension et l'intensité sont en phase

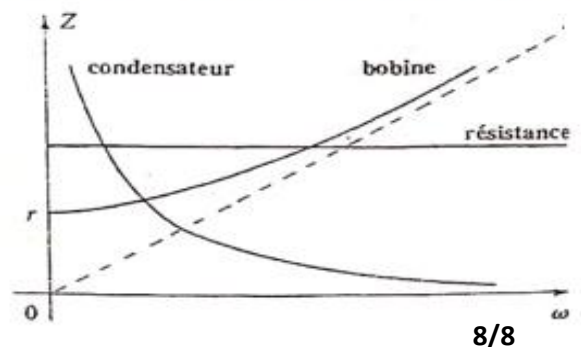


L'effet inductif l'emporte sur l'effet capacitif: $\varphi > 0$ et $\omega > \omega_0$. La tension est en avance sur l'intensité



L'effet capacitif l'emporte sur l'effet inductif: $\varphi < 0$ et $\omega < \omega_0$. La tension est en retard sur l'intensité

Variation de l'impédance Z en fonction de ω dans le cas d'un condensateur, d'une bobine et d'une résistance



FIN

P 12/13 : ASPECTS ONDULATOIRE ET CORPUSCULAIRE DE LA LUMIERE : INTERFERENCE LUMINEUSE-EFFET PHOTOELECTRIQUE.

Introduction :

La lumière a toujours eu un côté mystérieux qui a interpellé les physiciens du XIX^{ème} siècle. Tour à tour onde ou corpuscule, elle semble échapper à toute représentation une et entière.

Les physiciens du XX^{ème} siècle (Louis de Broglie) ont parlé de «**complémentarité**» et de «**dualité**» pour rendre compte de ces deux aspects qui s'excluent l'une sur l'autre.

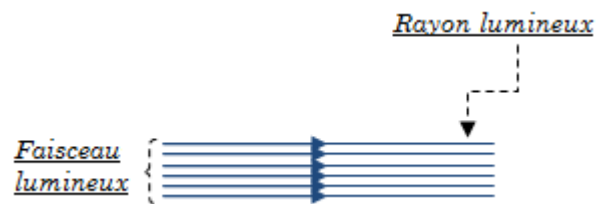
I. Aspect ondulatoire de la lumière : interférence lumineuse

I-1. Propagation de la lumière :

La lumière se propage en ligne droite dans un milieu transparent, homogène et isotrope.

Elle est considérée comme une onde électromagnétique sinusoïdale de fréquence ν , de période temporelle T , de période spatiale (ou longueur d'onde) λ et à la vitesse c (célérité de la lumière) dans le vide.

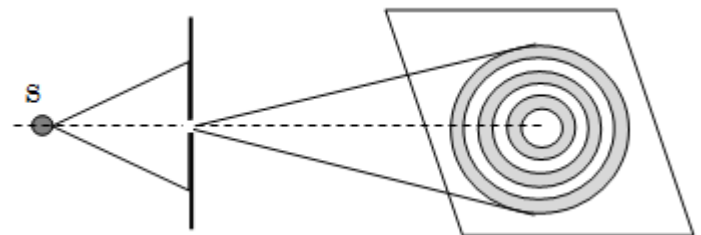
$$\text{On a : } \lambda = cT ; \quad \nu = \frac{1}{T} \Rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu}$$



I-2. Phénomène de diffraction :

On envoie un faisceau lumineux sur une plaque opaque percée d'une ouverture de faible épaisseur.

Sur un écran placé à une distance D de la plaque, on observe une tâche centrale brillante entourée d'anneaux alternativement sombres et brillants : On dit que la *lumière est diffractée*.



Ce phénomène (diffraction) se produit lorsque l'ouverture par laquelle passe la lumière est de petite taille (dimension voisine de la longueur d'onde de la lumière).

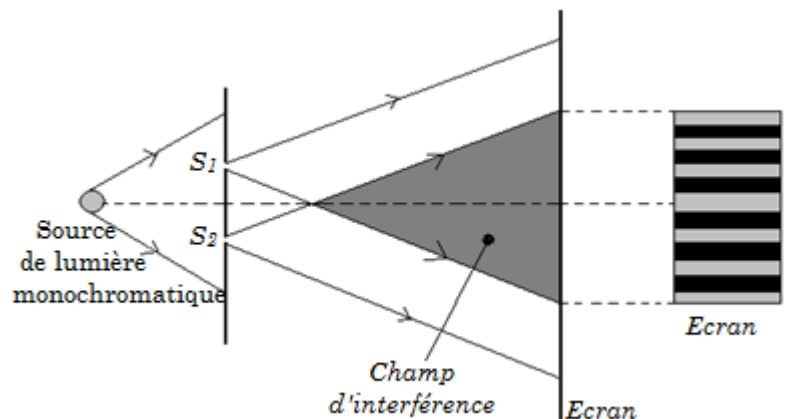
La diffraction met en évidence le caractère ondulatoire de la lumière.

I.3) - Mise en évidence du phénomène d'interférence

I.3-1. Expérience de la double fente de Young (Thomas, 1801)

Description du dispositif expérimental

On envoie un faisceau de lumière monochromatique sur une plaque opaque percée de deux fentes fines distantes de a (très faible). Un écran (E) est placé à une distance D de la plaque.



Observation et interprétation

- ☞ Il se produit au niveau de chaque fente le phénomène de diffraction lumineuse,
 - ☞ Apparition sur l'écran des raies fines, équidistantes et alternativement claires (brillantes) et sombres (obscurées) appelées *franges d'interférences* dans la partie commune aux deux faisceaux diffractés appelées *zone (ou champ) d'interférence*. La frange centrale est brillante.
- Ces franges d'interférences lumineuses résultent de la superposition de deux sources de lumières identiques et monochromatiques.

Conclusion

L'interférence lumineuse constitue ainsi une preuve de la nature (phénomène, caractère ou modèle) ondulatoire de la lumière.

Une onde lumineuse se propage dans le vide suivant un mouvement rectiligne sinusoïdal, de période temporelle T , de période spatiale appelée longueur d'onde λ et de fréquence ν .

$$\lambda = c.T = \frac{c}{\nu}$$

I.3-2. Conditions d'obtention d'interférences

Pour obtenir des franges d'interférences, les deux sources doivent être cohérentes et synchrones.

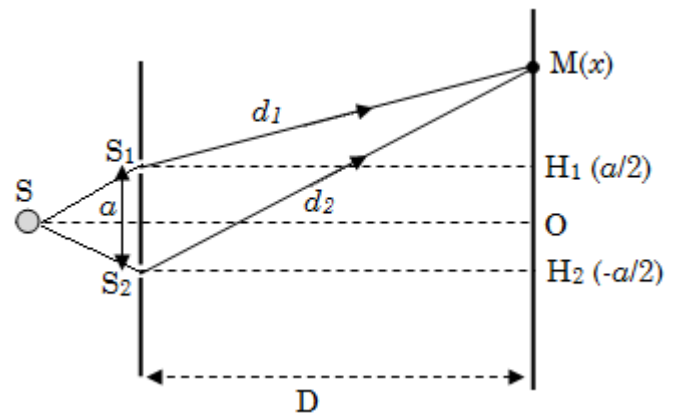
- ☞ **Sources cohérentes :** Sources qui présentent entre elles un déphasage constant.
- ☞ **Sources synchrones :** Sources qui émettent avec la même fréquence et la même amplitude.

I.4)- Etude analytique du phénomène d'interférence

I.4-1. Différence de marche

En un point M du champ interférentiel, des vibrations issues des sources S_1 et S_2 arrivent l'une par rapport à l'autre avec un certain retard de temps qui dépend de la différence $S_2M - S_1M$ appelée différence de marche (δ)

$$\text{On a : } \delta = S_2M - S_1M = d_2 - d_1$$



$$\begin{cases} S_1MH_1 \text{ triangle rectangle en } H_1 \Rightarrow d_1^2 = D^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2 \\ S_2MH_2 \text{ triangle rectangle en } H_2 \Rightarrow d_2^2 = D^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2 \end{cases}$$

$$d_2^2 - d_1^2 = (d_2 - d_1)(d_2 + d_1) = \left[D^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2 - D^2 - \left(x - \frac{a}{2}\right)^2 \right] = \left(x + \frac{a}{2} + x - \frac{a}{2}\right) \left(x + \frac{a}{2} - x + \frac{a}{2}\right) = 2a.x$$

$$\Rightarrow \delta = d_2 - d_1 = \frac{2a.x}{d_1 + d_2} \quad \text{Or M est au voisinage de O : } d_1 \approx d_2 \approx D \Rightarrow d_1 + d_2 = 2D$$

$$\delta = \frac{2a.x}{2D} = \frac{a.x}{D}$$

I.4-2. Interférence constructive

L'interférence est dite constructive si l'amplitude de l'onde résultante est maximale (l'éclairement est maximal).

$$\Rightarrow \cos\left(\frac{\pi.\delta}{\lambda}\right) = \pm 1 \Rightarrow \frac{\pi.\delta}{\lambda} = k\pi \Rightarrow \delta = k.\lambda$$

Les deux sources issues des deux fentes S_1 et S_2 arrivent en phase au point M milieu d'une frange brillante.

Position des franges brillantes

$$\text{On a : } \delta = k.\lambda = \frac{a.x}{D} \Rightarrow x_k = k \frac{\lambda D}{a}$$

Remarque :

- Si $k = 0$; $x_0 = 0$: frange centrale brillante.
- Si $k = 1$; $x_1 = \frac{\lambda D}{a}$: 1^{re} frange brillante.

I.4-3. Interférence destructive

L'interférence est dite destructive si l'amplitude de l'onde résultante est nulle (l'éclairement est minimal).

$$\Rightarrow \cos\left(\frac{\pi.\delta}{\lambda}\right) = 0 \Rightarrow \frac{\pi.\delta}{\lambda} = \left(k + \frac{1}{2}\right)\pi \Rightarrow \delta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

Les deux sources issues des deux fentes S_1 et S_2 arrivent en opposition de phase au point M milieu d'une frange obscure (ou sombre).

Position des franges obscures

$$\text{On a : } \delta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda = \frac{a.x}{D} \Rightarrow x_k = \left(k + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda D}{a}$$

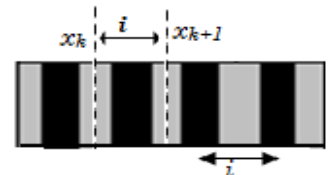
Remarque :

- Si $k = 0$; $x_0 = \frac{\lambda D}{2a}$: 1^{re} frange obscure.
- Si $k = 1$; $x_1 = \frac{3\lambda D}{2a}$: 2^e frange obscure.

I.4-4. Interfrange

☞ Définition :

L'interfrange i est la distance qui sépare les milieux de deux franges consécutives et de même nature : $i = x_{k+1} - x_k$



☞ Expression :

$$\checkmark \text{ Pour des franges brillantes : } i = x_{k+1} - x_k = (k+1)\frac{\lambda D}{a} - k\frac{\lambda D}{a} = \frac{\lambda D}{a}$$

$$\checkmark \text{ Pour des franges obscures : } i = x_{k+1} - x_k = \left(k + \frac{1}{2} + 1\right)\frac{\lambda D}{a} - \left(k + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda D}{a} = \frac{\lambda D}{a}$$

Quelque soit le type de frange, l'interfrange est donnée par la relation :

$$i = \frac{\lambda D}{a}$$

☞ Ordre d'interférence :

L'ordre d'interférence en un point M est définie par : $p = \frac{\delta}{\lambda}$ où λ est la longueur d'onde de la radiation. Il permet de connaître la nature d'une frange.

✓ Si M est le milieu d'une frange brillante, on a alors : $p = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{k\lambda}{\lambda} = k$

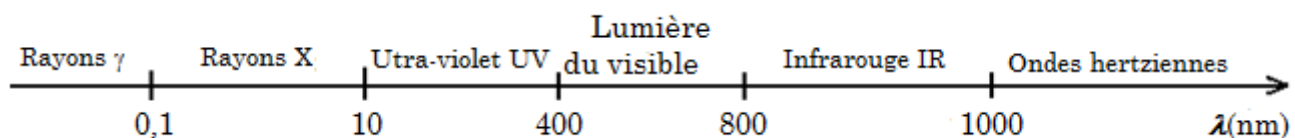
Les franges brillantes ont un ordre d'interférence entier.

✓ Si M est le milieu d'une frange obscure, on a alors : $p = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda}{\lambda} = k + \frac{1}{2}$

Les franges obscures ont un ordre d'interférence demi-entier.

I.5 Spectre des ondes électromagnétique

La connaissance de l'interfrange i permet de déterminer la longueur d'onde λ de la source et donc d'identifier la source et de préciser sa place dans le domaine des ondes électromagnétiques.



II) - Mise en évidence de l'effet photoélectrique

II-1. Expérience de Hertz (1887)

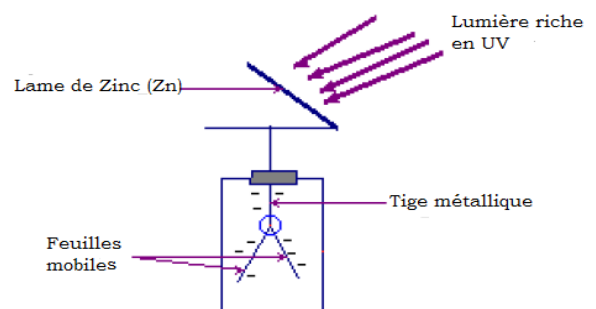
II.1.1. Dispositif expérimental

On envoie un faisceau de lumière riche en rayons ultraviolet sur une lame de zinc reliée à un électroscope initialement chargé

II.1.2. Observation

☞ Si on charge négativement l'électroscope, les feuilles mobiles s'écartent de la tige d'un angle α_0 ,

☞ L'angle α_0 diminue progressivement, lorsque la lame de zinc est éclairée avec une lumière riche en rayons ultraviolet,



☞ L'angle α_0 ne diminue plus, si on intercale une plaque de verre entre la source de lumière et la lame de zinc (arrêt des rayons UV),

☞ L'angle ne diminue pas si on remplace la lame de zinc par une autre lame en conservant la même lumière riche en rayons UV,

☞ L'angle ne diminue pas si on conserve la lame de zinc et on éclaire avec une autre lumière

☞ Si l'électroscope est chargé positivement, quelque soit la lumière utilisée pour éclairer la lame de zinc, l'angle ne diminue pas.

II.1.3. Interprétation

❖ L'angle diminue car les charges négatives remontent pour combler le déficit dû aux électrons extraits de la lame de zinc par la lumière riche en UV.

- ❖ Les électrons de la lame de zinc ne peuvent être extraits que par une lumière riche en rayon UV.
- ❖ A chaque métal correspond une lumière convenable permettant de lui extraire des électrons.
- ❖ Quand on charge positivement l'électroscope, il n'y a pas d'extraction d'électrons car les électrons extrais reviennent sur le métal attiré.

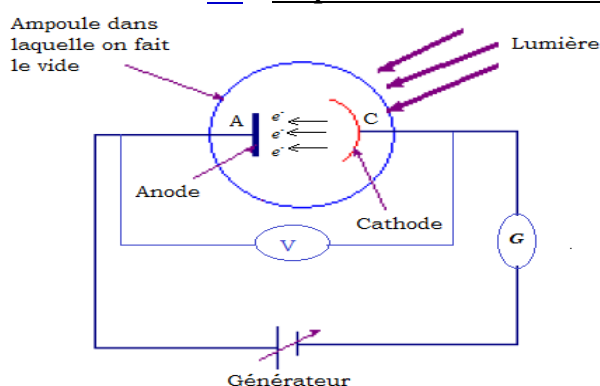
II-2. Définition

L'effet photoélectrique est l'extraction d'électrons d'un métal sous l'action d'un rayonnement électromagnétique convenable.

II-3. Cellule photoélectrique (ou photoémissive)

II.3-1. Dispositif expérimental

Expérience et observation



Expérience 01 :

La cathode C étant éclairée, on augmente progressivement la tension U_{AC} , on constate que l'aiguille du galvanomètre dévie et que cette déviation cesse dès qu'on cesse d'éclairer la cathode.

Expérience 02 :

La tension U_{AC} étant gardée positive, on éclaire la cathode avec des lumières de fréquence variables, on constate que quand la fréquence diminue, il existe

alors une fréquence ν_0 en deçà de laquelle le galvanomètre ne dévie plus.

Expérience 03 :

Quand on applique une tension U_{AC} nulle, on constate qu'un courant passe dans le circuit (l'aiguille du galvanomètre dévie).

Interprétation

- ☞ L'effet photoélectrique est un phénomène instantané
- ☞ Il n'y a pas extraction d'électrons si la fréquence est inférieure à la fréquence seuil ν_0 . Chaque métal est caractérisé par sa fréquence seuil ou sa longueur d'onde seuil λ_0 .
- ☞ Certains électrons extraits n'ont pas besoin d'être accélérés par la tension U_{AC} pour arriver à l'anode et donner un courant électrique : ce sont des électrons d'énergie cinétique maximale.

II.3-2. Seuil photoélectrique

Pour un métal pur, l'émission photoélectrique ne se produit que si la fréquence ν de la lumière excitatrice est supérieure ou égale à la fréquence seuil du métal, l'émission est alors instantanée.

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} \quad \left\{ \begin{array}{l} \otimes \nu_0 \text{ la fréquence seuil du métal} \\ \otimes \lambda_0 \text{ la longueur d'onde seuil} \end{array} \right. \quad \text{Si } \nu \geq \nu_0 \Rightarrow \lambda \leq \lambda_0$$

Exemples de seuil photoélectriques :

Métal	Na	Zn	Cu	Cs
λ_0 (nm)	520	370	290	656

II-4. Interprétation de l'effet photoélectrique : Théorie d'Einstein

Les différentes expériences montrent que c'est la lumière qui fournit aux électrons de l'énergie pour les faire sortir du métal. Selon Einstein :

- ☞ L'énergie lumineuse émise, se propage et est absorbée sous forme de grain d'énergie appelée « **photon** ». Le photon est une particule relativiste sans masse et sans charge électrique.
- ☞ Un photon correspondant à une lumière monochromatique de fréquence ν possède l'énergie :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{où } h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s est la constante de Planck}$$

☞ L'effet photoélectrique est une interaction entre un photon de la lumière et un électron du métal.

Remarque :

Les échanges d'énergie entre le métal et le rayonnement lumineux s'effectuent par paquet d'énergie (quantum d'énergie).

Si un photon d'énergie $h\nu$ heurte un électron, le photon est absorbé et l'énergie du photon est répartie :

✓ $h\nu_0$ est utilisé par l'électron pour sortir du métal : c'est **l'énergie d'extraction** du métal.

$$\text{On a } W_0 = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

Métal	Li	Cs	Rb	K	Na	Zn
W_0 en eV	2,39	1,89	2,13	2,15	2,27	4,31

✓ Le reste $h\nu - h\nu_0$ est **l'énergie cinétique** des électrons extraits

$$\text{On a } E_{C_{\max}} = h\nu - h\nu_0 = h(\nu - \nu_0) = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)$$

III.) Dualité onde corpuscule

La lumière se présente sous deux aspects :

✓ **L'aspect ondulatoire** : La lumière est considérée comme une onde sinusoïdale progressive de

$$\text{longueur d'onde } \lambda = cT = \frac{c}{\nu}$$

✓ **L'aspect corpusculaire** : La lumière est constituée de corpuscules appelés *photons* animés d'une

$$\text{vitesse } C \text{ (célérité de la lumière) et transportant chacun un quantum d'énergie : } E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Conclusion : Dualité onde – corpuscule :

Dès lors, la conception corpusculaire de la lumière ne s'oppose plus à la conception ondulatoire. Il existe donc une dualité onde corpuscule. Les deux modèles sont complémentaires : la lumière se comporte à la fois comme une onde et comme un ensemble de particules ; le comportement de la lumière dépend des conditions d'observation. Selon le phénomène étudié, l'un des aspects peut l'emporter sur l'autre.

IV.) Quelques applications

L'effet photoélectrique est entré dans notre vie de tous les jours. Il est largement utilisé par :

☞ Les cellules photovoltaïques : transformation de l'énergie solaire en énergie électrique.

☞ Les cellules photoélectriques dans les systèmes de sécurité, portes automatiques, ...

« Un faisceau lumineux (invisible) tombant sur une photopile y produit un courant photoélectrique dont la suppression par un corps déclenche le fonctionnement d'un dispositif ».

CHAPITRE P14 : Niveaux d'énergie de l'atome

I. SPECTRES ATOMIQUES

I.1. Exemples de spectres d'émission et d'absorption de quelques atomes

Spectre d'absorption de Na →



Spectre d'émission de Na →

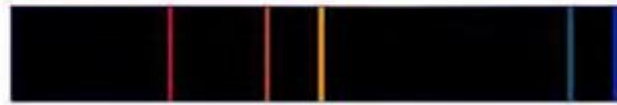


spectre d'émission et d'absorption du sodium (Na)

Spectre d'absorption de Hg →



Spectre d'émission de Hg →



spectre d'émission et d'absorption du mercure (Hg)

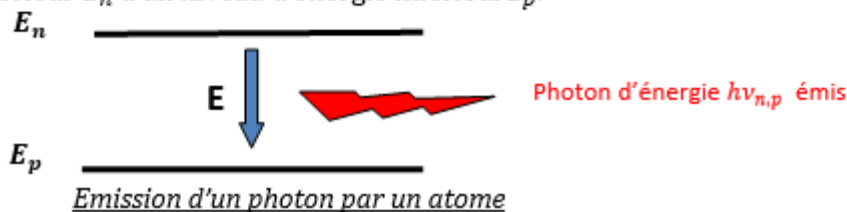
I.2. Description

- Les spectres d'émission atomiques sont formés de raies fines et colorées correspondant à des longueurs d'onde bien déterminées.
- Les spectres d'émission caractérisent les atomes qui les produisent.
- Les spectres d'absorption atomiques sont constitués de fines raies noires dans un spectre continu. Les longueurs d'onde des raies émises (dans le spectre d'émission) sont les mêmes que celles des longueurs d'onde des raies absorbées (dans le spectre d'absorption).

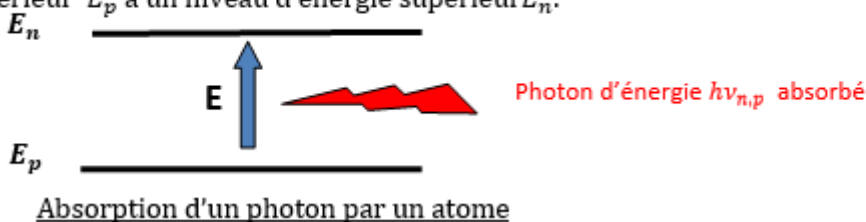
I.3 Interprétation des spectres atomiques

Pour expliquer l'émission et l'absorption des radiations par les atomes, ainsi que la discontinuité des spectres d'émission et d'absorption, **BOHR** proposa la théorie suivante.

- ✚ L'énergie d'un atome ne peut pas prendre n'importe quelle valeur, la suite des valeurs physiquement possibles est **discontinue**. On dit que l'énergie est **quantifiée**. A chaque valeur possible de cette énergie correspond un **niveau d'énergie** ou **état stationnaire d'énergie**.
- ✚ Les énergies des transitions électroniques sont quantifiées : un atome ne peut fournir ou absorber que des énergies qui ont une valeur bien déterminées.
- ✚ l'émission d'un photon de fréquence $\nu_{n,p}$ correspond au passage de l'atome d'un niveau d'énergie supérieur E_n à un niveau d'énergie inférieur E_p .



- ✚ l'absorption d'un photon de fréquence $\nu_{n,p}$ correspond au passage de l'atome d'un niveau d'énergie inférieur E_p à un niveau d'énergie supérieur E_n .



I.4. conclusion

Un atome ne peut passer d'un niveau d'énergie E_n à un niveau d'énergie E_p que par absorption ou émission d'un seul photon ou quantum d'énergie $E = h\nu$. Cette transition n'affecte qu'un seul électron de l'atome.

$$E = E_n - E_p = h\nu_{n,p} = \frac{hc}{\lambda_{n,p}}$$

II. CAS DU SPECTRE DE L'ATOME D'HYDROGENE

II.1. Energie de l'atome d'hydrogène

II.1.1. Expression

En étudiant le spectre des atomes, Bohr a montré que les valeurs possibles de l'énergie de l'atome d'hydrogène forment une suite de la forme :

$$E_n (\text{eV}) = -\frac{13,6}{n^2} = -\frac{E_0}{n^2} \text{ avec } n \in \mathbb{N}^*$$

n est le nombre quantique principal. L'énergie de l'atome est quantifiée, elle dépend de n .

II.1.2. les niveaux d'énergie

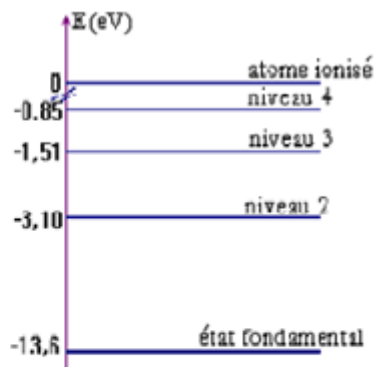


Diagramme d'énergie de l'atome d'hydrogène

- **l'état fondamental** correspond à l'état d'énergie minimale ($n = 1 \Rightarrow E_1 = -13,6 \text{ eV}$): c'est l'état le plus stable;
- lorsque $n > 1 \Rightarrow$ l'atome est dans l'un des états excités. L'état excité a toujours tendance à revenir à son état fondamental: on dit qu'il se **désexcite**.
- **L'énergie d'ionisation (E_i)** de l'atome d'hydrogène à partir de son état fondamental est l'énergie qu'il faut fournir à l'électron pour l'amener du niveau $n=1$ à l'infini.

$$E_i = E_\infty - E_0 = 0 - (-E_0) = \hat{E}_0 = 13,6 \text{ eV}$$

II.2. Série de raies d'émission

Considérons le passage de l'électron de l'atome d'hydrogène d'un niveau n à p tel que $p < n$. En calculant le nombre d'onde ($\sigma = \frac{1}{\lambda}$) du photon émis, on peut retrouver la relation empirique de Balmer :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ où } R_H = 1,096776 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$$E = E_n - E_p \text{ avec } E_n (\text{eV}) = -\frac{13,6}{n^2} = -\frac{E_0}{n^2}$$

$$h \frac{c}{\lambda} = -\frac{E_0}{n^2} - \left(-\frac{E_0}{p^2} \right) = -\frac{E_0}{n^2} + \frac{E_0}{p^2} = E_0 \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{E_0}{hc} \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

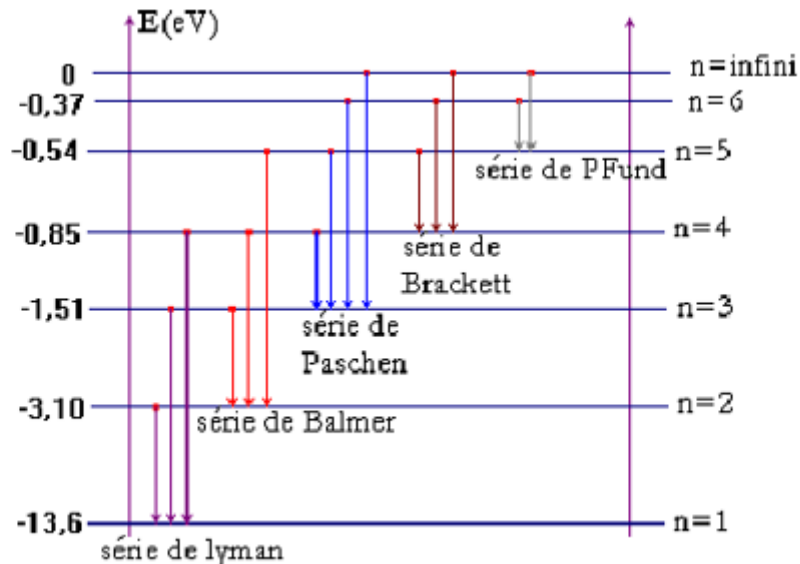
avec R_H constante de Rydberg $R_H = \frac{E_0}{hc} = \frac{13,6 \times 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,62 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8} = 1,09 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$

Une série correspond aux transitions qui aboutissent au même niveau d'énergie.

- la première série a été découverte par Balmer (**série de Balmer**). Elle comporte les raies des transitions aboutissant au niveau d'énergie $n=2$ donc $p = 2$ et $n > 2$, les longueurs d'onde des radiations sont données par la formule

$$\frac{1}{\lambda_{n,2}} = R_H \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

- Série de Lyman:** elle comporte toutes les transitions qui correspondent au retour à l'état fondamental $n=1$
- Série de Paschen:** retour à l'état $n=3$
- Série de Brackett:** retour à l'état $n=4$
- Série de PFund:** retour à l'état $n=5$



III. APPLICATIONS

- Identification d'éléments chimiques
- Détermination de la composition chimique des corps

FIN

EXERCICES

EXERCICE 1:

On donne : la constante de Planck : $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$; la célérité de la lumière $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène sont donnés par la relation :

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2} \text{ avec } E_0 = 13,6 \text{ eV et } n \in \mathbb{N}^*$$

1°) a- Représenter, à l'échelle 1 cm pour 1 eV, les trois premiers niveaux d'énergie ($n = 1$; $n = 2$ et $n = 3$) ainsi que le niveau $E = 0 \text{ eV}$.

b- Expliquer la phrase : les niveaux d'énergie de l'atome sont quantifiés.

2°) a- Donner la valeur de l'énergie de l'atome d'hydrogène dans son état fondamental.

b- Préciser l'état de l'atome d'hydrogène pour le niveau $E = 0 \text{ eV}$.

3°) Lorsqu'un atome d'hydrogène absorbe une radiation de longueur d'onde λ , il passe d'un niveau d'énergie n à un autre p .

a- Comparer p à n .

b- Montrer que la longueur d'onde λ de la radiation absorbée s'exprime par : $\lambda = \frac{hc}{E_p - E_n}$; avec h est la constante

de Planck et c la célérité de la lumière.

c- Déterminer la plus grande longueur d'onde λ des radiations que peut absorber l'atome d'hydrogène supposé dans son état fondamental.

4°) On fournit à l'atome d'hydrogène pris dans son état fondamental ($n = 1$) une énergie $W = 15 \text{ eV}$.

a- Indiquer si cette énergie est susceptible d'être absorbée par l'atome d'hydrogène.

b- Préciser dans quel état se trouve l'atome dans ce cas.

5°) Les radiations suivantes constituent le spectre d'émission dans le visible de l'atome d'hydrogène.

Couleur	rouge	bleu-vert	indigo	violet
λ (μm)	0,656	0,486	0,434	0,410

a- Préciser, en le justifiant, si un tel spectre est continu ou discontinu.

b- Décrire brièvement un dispositif qui permet d'obtenir un tel spectre.

c- Peut-on trouver un autre élément chimique qui possède un spectre d'émission identique à celui de l'hydrogène ? Justifier la réponse.

d- Décrire le spectre d'absorption de l'hydrogène.

EXERCICE 2:

En 1859, en collaboration avec R. Brunsen, G. Kirchhoff publie trois lois relatives à l'émission et à l'absorption de la lumière par les gaz, les liquides et les solides. Pour le cas de l'hydrogène, cette émission (ou absorption) de lumière correspondant à des transitions électroniques entre niveaux d'énergie, l'énergie d'un niveau étant donnée par la relation : $E_n = -\frac{E_0}{n^2}$ avec $E_0 = 13,6 \text{ eV}$, et n est le nombre quantique principal.

4.1 Préciser, pour chaque atome d'hydrogène, le niveau de plus basse énergie correspondant à l'état fondamental.

4.2 L'atome d'hydrogène peut passer d'un état excité de niveau p à un autre niveau $n < p$ en émettant des radiations. Exprimer, en fonction de E_0 , h , n et p , la fréquence ν des radiations émises par l'atome d'hydrogène lors de cette transition.

4.3 Dans certaines nébuleuses, l'hydrogène émet des radiations de fréquences $\nu = 4,57 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Ces radiations correspondent à une transition entre un niveau excité d'ordre p et le niveau d'ordre $n = 2$. Déterminer la valeur de p correspondant au niveau excité.

4.4 Une série de raies correspond à l'ensemble des radiations émises lorsque l'atome passe des différents niveaux excités p au même niveau n . Pour l'hydrogène, on a entre autre, les séries de raies de Lyman ($n = 1$), de Balmer ($n = 2$) et de Paschen ($n = 3$).

I. NOYAU ATOMIQUE

1 Composition du noyau d'un atome

Le noyau atomique est composé de protons et de neutrons. L'ensemble protons et neutrons constituent les nucléons.

Le nombre de protons dans le noyau est noté Z il est appelé numéro atomique ou nombre de charge. Le nombre de neutrons est noté N.

Le nombre de nucléons appelé aussi nombre de masse est noté $A = Z + N$

Le noyau d'un élément chimique appelé aussi nucléide est ${}^A_Z X$, X étant le symbole de l'élément.

Exemple : ${}^1_1 H$; ${}^{12}_6 C$; ${}^{27}_{13} Al$; ${}^{238}_{92} U$; ${}^{14}_6 C$

Remarque

* Des noyaux sont dits isotopes s'ils ont le même numéro atomique Z mais des nombres de masse différents A. ${}^{12}_6 C$ et ${}^{14}_6 C$

* Des noyaux sont dits isobares s'ils ont le même nombre de masse A mais des numéros atomiques différents Z.

2 Dimension du noyau

Le noyau d'un élément chimique est assimilé à une sphère de rayon proportionnel à la racine cubique de son nombre de masse A.

$$R = R_0 \sqrt[3]{A} ; R_0 = 1,2 \cdot 10^{-15} m = 1,2 f.m ; 1 \text{ fermi}(f.m) = 10^{-15} m$$

3 Masse du noyau : défaut de masse

La masse du noyau est inférieure à la somme des de ses constituants (protons et neutrons). On appelle défaut de masse du noyau la quantité :

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_x = Zm_p + (A - Z)m_n - m_x$$

4 Equivalence masse énergie

D'après Einstein, la masse est une forme d'énergie. Tout corps de masse m au repos, possède une énergie E telle que $E = mc^2$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

5 Unité de masse atomique : u

L'unité de masse atomique u est le 12^e de la masse d'un atome de carbone 12 (${}^{12}_6 C$)

$$M({}^{12}_6 C) = 12 \text{ g.mol}^{-1} ; 1u = \frac{1}{12} \times \frac{M({}^{12}_6 C)}{N_A} \cdot 10^{-3} \text{ A.N} \quad 1u = \frac{1}{12} \times \frac{12}{6,02 \cdot 10^{23}} \cdot 10^{-3}$$

$$1 u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Equivalence énergétique de u.

$$uc^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} \times (3 \cdot 10^8)^2 = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J} \quad \text{soit } uc^2 = \frac{1,4 \cdot 10^{-10}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 9,3125 \cdot 10^8 \text{ eV}$$

$$uc^2 = 931,25 \cdot 10^6 \text{ eV} \quad uc^2 = 931,25 \text{ MeV} ; 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

6 Energie de liaison ou de cohésion du noyau : E_l

L'énergie de liaison du noyau est l'énergie qu'il faut fournir au noyau initialement au repos, pour séparer ses constituants, eux aussi au repos.

Conservation de l'énergie : C.E : $E_\ell + m_x c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2$
 $\Rightarrow E_\ell = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - m_x c^2 \Rightarrow E_\ell = (Zm_p + Nm_n - m_x) c^2$

Or $Zm_p + Nm_n - m_x = \Delta m$ (défaut de masse) $E_\ell = \Delta m \cdot c^2$

7 Energie de liaison par nucléon : E_a

Pour rendre compte de la stabilité des noyaux, on définit l'énergie de liaison par nucléon E_a

$$E_a = \frac{E_\ell}{A}$$

Plus E_a est grand, plus le noyau est stable.

- Si $E_a \geq 8 \text{ MeV/nucléon}$ le noyau est stable.
- Si $E_a < 8 \text{ MeV/nucléon}$ le noyau est instable.

II. REACTIONS NUCLEAIRES SPONTANÉES ; LA RADIOACTIVITE

1 Définition

La radioactivité est une transformation au cours de laquelle un noyau instable se transforme en un autre noyau avec émission de rayonnement. La radioactivité est une réaction dite nucléaire car elle concerne le noyau de l'atome par opposition aux réactions chimiques qui ne concernent que le cortège électronique sans modifier le noyau.

Les transformations radioactives peuvent être :

Spontanées : elles se produisent seules et ne nécessitent aucune intervention

Aléatoires : Il est impossible de prévoir, pour un noyau donné, l'instant de sa

désintégration

Inéluçables rien ne peut les empêcher ou de modifier leur cours

Elles sont indépendantes des paramètres habituels (pressions, températures....)

2 Les différents types de rayonnement

Il existe 4 types de rayonnement ou radioactivité.

Le rayonnement α (${}^4_2\text{He}$: Hélium)

Le rayonnement β^- (${}^0_{-1}e$: électron)

Le rayonnement β^+ (0_1e : Positron)

Le rayonnement γ : particule sans masse qui produit une grande énergie.

3 Les lois de conservation

Dans toute réaction nucléaire il y a :

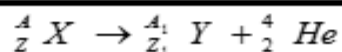
- la conservation du nombre de masse A
- la conservation du nombre de masse Z
- la conservation de l'énergie
- la conservation de la quantité de mouvement.

Les deux premières lois permettent d'équilibrer les réactions nucléaires.

4 Réactions nucléaires spontanées : radioactivité naturelle

4.1 Radioactivité : α (${}^4_2\text{He}$)

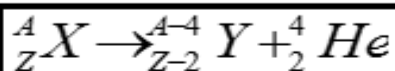
* Equation de la réaction.



noyau père noyau fils

$$* \text{ Equilibrons } \begin{cases} A = A_1 + 4 \\ Z = Z_1 + 2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A_1 = A - 4 \\ Z_1 = Z - 2 \end{cases}$$

* Equation équilibrée



Exemple : ${}^{226}_{88} \text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86} \text{Rn} + {}^4_2 \text{He}$

Radium Radon

* Conservation de l'énergie

$$m_x c^2 = m_y c^2 + E_{Cy} + m_\alpha c^2 + E_{C\alpha} \Rightarrow E_{Cy} + E_{C\alpha} = m_x c^2 - m_y c^2 - m_\alpha c^2$$

$$\Rightarrow E_{Cy} + E_{C\alpha} = (m_x - m_y - m_\alpha) c^2 \quad \text{or} \quad (m_x - m_y - m_\alpha) c^2 = E_{Cy} + E_{C\alpha} = E$$

Q : énergie libérée au cours de la réaction.

* Conservation de la quantité de mouvement

$$\vec{P}_x = \vec{P}_y + \vec{P}_\alpha \Rightarrow m_x \vec{V}_x = m_y \vec{V}_y + m_\alpha \vec{V}_\alpha \quad \text{or} \quad X \text{ étant immobile} \Rightarrow \vec{V}_x = 0$$

$$\Rightarrow m_y \vec{V}_y = -m_\alpha \vec{V}_\alpha ; Y \text{ et } \alpha \text{ se déplacent en sens contraire il y a recul de Y}$$

après la désintégration.

$$m_y V_y = m_\alpha V_\alpha$$

$$\begin{cases} m_y V_y = m_\alpha V_\alpha & (1) \\ E_{Cy} + E_{C\alpha} = E & (2) \end{cases}$$

$$(1)^2 \Rightarrow m_y^2 V_y^2 = m_\alpha^2 V_\alpha^2 \Rightarrow \frac{1}{2} m_y^2 V_y^2 = \frac{1}{2} m_\alpha^2 V_\alpha^2$$

$$m_y \cdot \frac{1}{2} m_y V_y^2 = m_\alpha \cdot \frac{1}{2} m_\alpha V_\alpha^2 \Rightarrow m_y E_{Cy} = m_\alpha E_{C\alpha} \Rightarrow \boxed{\frac{E_{Cy}}{E_{C\alpha}} = \frac{m_\alpha}{m_y}} \quad (3)$$

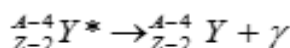
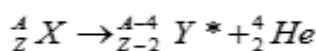
$$E_{Cy} = \frac{m_\alpha}{m_y} E_{C\alpha} \quad (4)$$

$$(4) \text{ dans } (2) \Rightarrow \frac{m_\alpha}{m_y} E_{C\alpha} + E_{C\alpha} = E \Rightarrow E = E_{C\alpha} \left(1 + \frac{m_\alpha}{m_y} \right)$$

$$\Rightarrow \boxed{E_{C\alpha} = \frac{E}{1 + \frac{m_\alpha}{m_y}}} ; \quad \boxed{E_{Cy} = \frac{E}{1 + \frac{m_y}{m_\alpha}}}$$

Remarque :

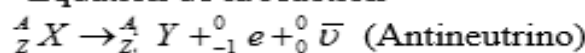
Souvent le noyau fils est émis dans un état excité, alors il revient à l'état fondamental avec émission d'un rayonnement γ selon l'équation.



$$\boxed{Q = E_{C\alpha} + E_{Cy} + E_{C\gamma} = (m_x - m_y - m_\alpha) c^2}$$

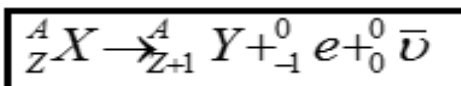
4.2 Radioactivité β^- (${}^0_{-1} e$)

*Equation de la réaction



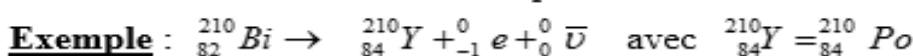
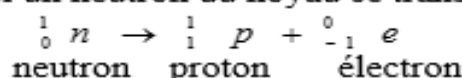
* Equilibrons: $A = A_1$; $Z = Z_1 - 1$; $\Rightarrow A_1 = A$ et $Z_1 = Z + 1$

Equation équilibrée:



Remarque:

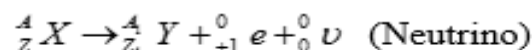
Tout se passe comme si un neutron du noyau se transforme en proton et en électron selon l'équation.



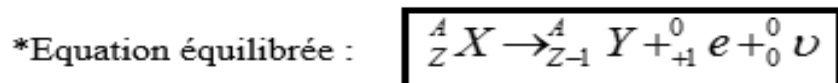
*Bilan énergétique : $[m_x - (m_y + m_{\beta^-})] c^2$

4.3 Radioactivité β^+ (${}^0_1 e$)

*Equation de la réaction :



*Equilibrons : $A = A_1$ et $Z = Z_1 + 1 \Rightarrow A_1 = A$ et $Z_1 = Z - 1$



*Bilan énergétique.

$$E = [m_x - (m_y + m_{\beta^+})] c^2$$

4.4 Radioactivité γ

La radioactivité accompagne les radioactivités α , β^+ et β^-

Le noyau fils est obtenu dans un état excité. Cet état instable le noyau se désexcite en évacuant cette énergie excédentaire sous forme d'un rayonnement électromagnétique

5 Loi de décroissance radioactive

5.1 Expression du nombre de noyaux restant en fonction du temps

Soit ${}^A_Z X$ un noyau instable qui subit de manière spontanée une réaction

nucléaire d'équation : ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z_1} Y + \text{rayonnement } (\alpha, \beta^-, \beta^+, \gamma)$

$$\text{à } t = 0 \quad N_0 \quad 0$$

$$t \neq 0 \quad N_0 - x \quad x$$

$N_r = N(t) = N_0 - x$ x : nombre de noyaux désintégrés.

L'expérience a montré que la variation du nombre de noyaux restants par rapport au temps est proportionnelle au nombre de noyaux restants au même instant.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \Rightarrow dN = -\lambda N dt \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int \frac{dN}{N} = -\int \lambda dt \Rightarrow +\ln N = -\lambda t + cte$$

$$\Rightarrow N = e^{-\lambda t + cte} = e^{cte} \times e^{-\lambda t} \text{ OR } e^{cte} = C \Rightarrow N = C e^{-\lambda t}$$

$$\text{à } t = 0 : N = N_0 \text{ (C.I.)} \Rightarrow N_0 = C e^{-\lambda \cdot 0} \Rightarrow C = N_0 \Rightarrow \boxed{N = N_0 e^{-\lambda t}}$$

* $N(t)$: nombre de noyaux de ${}^A_Z X$ restant à l'instant t .

* N_0 : nombre de noyaux de ${}^A_Z X$ instable.

* λ : constante positive caractéristique du noyau: appelée **constante radioactive**.

5.2 Période radioactive ou durée de la demi-vie

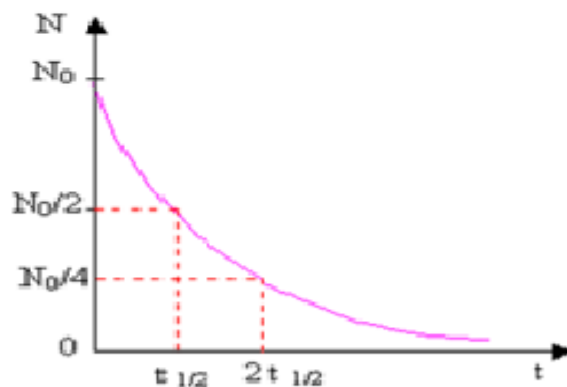
La période radioactive T ou $t_{1/2}$ est le temps au bout duquel la moitié de nombre de noyaux initial s'est désintégrée.

$$\text{à } t = T ; N = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow e^{-\lambda T} = \frac{1}{2} \Rightarrow \ln e^{-\lambda T} = \ln \frac{1}{2} \quad -\lambda T = -\ln 2$$

$$\Rightarrow \boxed{T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}}$$

5.3 Représentation graphique de $N = f(t)$

t	0	T	2T	3T
N	N_0	$\frac{N_0}{2}$	$\frac{N_0}{4}$	$\frac{N_0}{8}$



5.4 Activité radioactive

L'activité $A(t)$ d'une substance radioactive est le nombre de désintégration par seconde.

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

4/6

$$\text{Or } N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t) \quad A(t) = \lambda N(t)$$

$$\text{à } t=0 : A_0 = \lambda N_0 \quad \text{à } t : A(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \boxed{A(t) = A_0 e^{-\lambda t}; A_0 = \lambda N_0}$$

Dans le S.I l'unité de l'activité est le Becquerel (Bq). On utilise couramment le Curie (Ci)

$$1\text{Bq} = 1 \text{ désintégration/s} \quad 1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Bq.}$$

Remarque : $A = A_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \ln A = \ln A_0 e^{-\lambda t} = \ln A_0 + \ln e^{-\lambda t}$

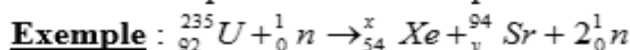
$$\boxed{\ln A(t) = -\lambda t + \ln A_0}$$

La courbe $\ln A(t) = f(t)$ est une droite affine de pente $P = -\lambda$ et d'ordonnée à l'origine $\ln A_0$

III. Réactions nucléaires provoquées : radioactivité artificielle.

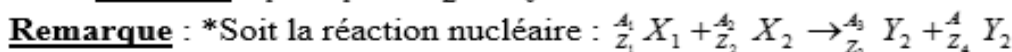
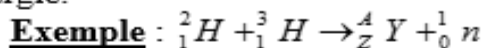
1 Fissions nucléaires.

Une fission nucléaire est une réaction au cours de laquelle un noyau lourd s'éclate sous l'impact d'un neutron pour donner d'autres noyaux plus légers.



2 Fusions nucléaires.

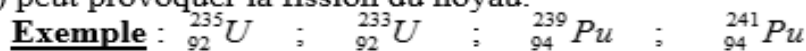
Des noyaux légers se fusionnent pour donner un noyau lourd avec dégagement d'énergie.



L'énergie libérée au cours de la réaction est :

$$E = [(A_1 \cdot E_a(\text{X}_1) + A_2 \cdot E_a(\text{X}_2)) - (A_3 \cdot E_a(\text{Y}_1) + A_4 \cdot E_a(\text{Y}_2))]$$

* Un noyau est dit fissile si un neutron thermique (se déplace avec une vitesse lente) peut provoquer la fission du noyau.



* Un noyau est dit fertile s'il peut engendrer un noyau fissile sous l'action d'un neutron. **Exemple** : ${}_{92}^{238}\text{U}$; ${}_{90}^{232}\text{Th}$

Quelques Familles radioactives

C'est l'ensemble des nucléides issus d'un même noyau père. Les éléments radioactifs naturels sont classés en 4 familles.

- La famille du Neptunium : Np.
- La famille de l'Uranium : U
- La famille de l'Actinium : Ac
- La famille du Thorium : Th

IV. Application et danger de la radioactivité

1 Application de la radioactivité :

- **Les centrales nucléaires** : Dans les centrales nucléaires, l'énergie provient de la fission de l'uranium dans le réacteur. La quantité d'énergie produite sert à vaporiser l'eau du circuit. La vapeur d'eau ainsi produite à haute température et sous forte pression alimente une turbine qui entraîne un alternateur.
- **Datation** : on détermine l'âge d'un objet en bois ancien en mesurant l'activité en carbone 14 de deux masses égales de carbone. L'une provenant d'un jeune bois ($A_0 = N_0$) et l'autre prélevée sur le bois ancien ($A = N$)
- **Les traceurs radioactifs** : Contrôler en médecine le fonctionnement de la glande thyroïde grâce à l'iode radioactif ${}_{53}^{131}\text{I}$
- Utiliser l'hémoglobine marquée avec du fer pour contrôler une transfusion sanguine

- En radiothérapie, on irradie la tumeur par « la bombe à cobalt » (qui contient une source de cobalt Co ; On détruit les cellules cancéreuses)
- La radioactivité sert industriellement à vérifier les soudures d'une canalisation métallique, localiser une fuite dans un pipe-line ...

2 Les dangers de la radioactivité

- L'exposition au rayonnement radioactif est dangereuse pour l'homme ; elle provoque des lésions très souvent graves : brûlures, leucémies, cancers....
- Les accidents d'installation nucléaire (Comme Three Miles Island le 28 mars 1979 aux USA et surtout Tchernobyl en Union soviétique le 25 mars 1986) constituent des catastrophes de grandes ampleurs.

Application 1 On donne

Nucléide X	${}_{80}\text{Hg}$	${}_{82}\text{Pb}$	${}_{83}\text{Bi}$	${}_{84}\text{Po}$
Masse du nucléide m_X	203,9735u	205,9745u	208,9804u	209,9829u

$$m_a = 4,0026\text{u} ; 1\text{u} = 1,66 \cdot 10^{-27}\text{kg} ; 1\text{ci} = 3,7 \cdot 10^{10}\text{Bq} ; N = 6,02 \cdot 10^{23}\text{mol}^{-1}$$

1°) L'uranium ${}_{92}^{238}\text{U}$ se désintègre avec ses « descendants » en émettant des particules α ou β^- . Calculer le nombre de désintégration α et β^- , sachant qu'on aboutit au ${}^{206}\text{Pb}$.

Comment appelle-t-on l'ensemble des noyaux issus de l'uranium ${}^{238}\text{U}$ (lui-même compris) ?

2°) Le plomb ${}^{206}\text{Pb}$ peut être obtenu par une désintégration α et d'un noyau X avec une période $T = 138$ jours

2-a Ecrire l'équation-bilan de cette désintégration et identifier le noyau X.

2-b Calculer en Mev puis en joule l'énergie libérée par la désintégration du noyau X.

3°) On part d'un échantillon de 4,2 g de X.

3-a Calculer l'activité A_0 de cet échantillon. L'exprimer en becquerel puis en curie.

3-b Quelle est l'activité de cet échantillon au bout de 69 jours ?

3-c Quelle masse de cet échantillon se désintègre-t-il au bout de 552 jours ?

3-b Calculer l'énergie dégagée au bout de 552 jours

Application 2

1- Le premier nucléide radioactif a été obtenu en bombardant des noyaux d'aluminium 27 par des particules α . Ecrire l'équation de la réaction nucléaire sachant qu'il se forme un neutron en plus du noyau fils. Identifier ce noyau.

2- Ce noyau formé est radioactif β^+ . Ecrire l'équation de sa désintégration nucléaire : préciser le nucléide formé.

3- Le noyau radioactif a une période de 150s. Au bout de combien de temps, 90% des noyaux de l'échantillon initial sont désintégrés ?

Élé- ment	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl
Z	11	12	13	14	15	16	17

Application3 :

1- L'isotope ${}_{19}^{40}\text{K}$ est radioactif et se désintègre pour donner l'argon ${}_{18}^{40}\text{Ar}$

a- Ecrire l'équation de la désintégration.

b- Préciser la nature de la désintégration.

2- La période radioactif du potassium ${}^{40}\text{K}$ est égale à $1,5 \cdot 10^9$ année. Calculer sa constante radioactive puis en déduire sa durée de vie moyenne.

3- Pour déterminer l'âge d'un caillou lunaire rapporté par les astronautes d'Apollo VI, on mesure les quantités relatives de ${}^{40}\text{K}$ et de sa décomposition (${}^{40}\text{Ar}$ est en générale, retenu dans la roche).

Un échantillon de 1kg contient $8,2 \cdot 10^{-3}\text{cm}^3$ d'argon ${}^{40}\text{Ar}$ dans les CNTP et $1,6610^{-6}\text{g}$ de potassium ${}^{40}\text{K}$ radioactif. En déduire l'âge de la pierre.

FIN

6/6