



CONCOURS GÉNÉRAL SÉNÉGALAIS

16 T CGS 05 01

Durée : 6 heures

Toutes séries réunies

CLASSES DE TERMINALESESSION 2016**SCIENCES PHYSIQUES****THEME : Electricité et Magnétisme****TEXTE INTRODUCTIF**

Depuis l'antiquité, les hommes connaissaient déjà les phénomènes magnétiques et électriques :

X - les grecs connaissaient, 600 ans avant J. Christ, le pouvoir qu'avait l'ambre (résine végétale fossilisée) frotté d'attirer les objets légers tels que les duvets d'oiseaux par exemple ;

X - l'existence à l'état naturel d'un minerai de fer magnétique pouvant attirer de petits objets en fer était connue. Une application pratique du magnétisme fut découverte par les Chinois vers le XI<sup>ème</sup> siècle avec l'invention de la boussole. Transmise à l'Europe par les arabes, cette découverte fut utilisée en navigation mais ne donna lieu à aucun développement scientifique avant 1600.

Le médecin anglais William Gilbert (1547- 1603) avait traité dans son ouvrage « De magnetibus » toute une série de phénomènes magnétiques et électriques. Il introduisit le nom d'électricité pour désigner la force d'attraction qui apparaît lorsque l'ambre est frotté : il considère que l'ambre se charge d'électricité statique une fois frotté.

En 1629 l'italien Cabeo découvrit aussi l'existence des forces répulsives entre certains objets frottés.

Ainsi vers 1730 le français Du Fay émit l'hypothèse sur l'existence de deux sortes d'électricité : l'électricité positive et l'électricité négative.

En 1785 Charles Coulomb montra l'analogie entre les forces d'interactions électriques avec celles de la gravitation universelle : *les intensités des forces exercées entre charges électriques sont inversement proportionnelles au carré de la distance qui les sépare*. Ces interactions à distance sont décrites par un champ électrique  $\vec{E}$  analogue au champ de gravitation  $\vec{G}$ .

Tous ces travaux ne concernaient que l'électricité statique ou électrostatique.

L'appareil appelé pile Volta construit en 1799 par le physicien italien Alessandro Volta a permis la production du courant électrique permanent. Cette pile marqua le début de l'aventure électrique.

Dès lors que cette production de courant électrique eût vu le jour, de grandes découvertes se succédèrent :

X - l'électrolyse par les anglais Davy et Faraday qui a permis d'établir une relation entre la chimie et l'électricité ;  
 X - la création des champs magnétiques par les courants (de conduction) électriques (Christian Oersted, André Marie Ampère, Biot, Savart, Maxwell) ; cette découverte montra qu'il existe une relation entre magnétisme et électricité ;

- le fait qu'un mouvement d'ensemble de porteurs de charge (courants de convection), comme les courants de conduction, crée dans l'espace environnant un vecteur champ d'induction magnétique  $\vec{B}$  analogue à celui créé par un aimant (Rowland (1876) ; ce champ est responsable des interactions électromagnétiques observées ; ces aspects relèvent de la magnétostatique ;

- l'induction électromagnétique (Faraday, 1831) qui est à la base de la production du courant alternatif ;

- l'extension de la théorie de Faraday par James Maxwell physicien écossais (1831-1879) qui aboutit à une théorie électromagnétique de la lumière : *la lumière est due à la propagation simultanée d'un champ électrique et d'un champ magnétique* ; cette théorie est résumée en quatre équations fondamentales reliant le champ électrique  $\vec{E}$  et le champ d'induction magnétique  $\vec{B}$  ; c'est à partir de ces travaux de Maxwell qu'on a compris l'unicité du magnétisme et de l'électricité qu'on désigne aujourd'hui sous le nom d'électromagnétisme.

- l'existence des ondes rigoureusement semblables aux ondes lumineuses mais ayant des longueurs d'onde beaucoup plus grandes (ondes hertziennes) à ce que laissait prévoir Maxwell ; ce qui a été démontré vers 1880 par Heinrich Hertz physicien allemand (1857-1894) ; ces ondes permettent la transmission du son, de l'image (radar, téléphone, radio, télévision...), de l'écriture etc.

Dans la suite ne seront considérés que les aspects fondamentaux des phénomènes électriques et magnétiques en se référant le plus souvent possible à la structure de la matière.

**Partie I : Questions sur le texte (05 points)**

Lire attentivement le texte ci-dessus puis répondre aux questions suivantes :

I-1- A quelle période remonte la connaissance des premiers aspects portant sur les phénomènes électriques et magnétiques ?

- I-2- Donner le nom du premier appareil magnétique que l'homme a utilisé pour la navigation.
- I-3- Indiquer la similitude qui existe entre les interactions entre charges électriques et celles de la gravitation.
- I-4- Citer le phénomène physique qui est à la base de la production du courant alternatif.
- I-5- Sous quel nom désigne-t-on l'unicité du magnétisme et de l'électricité ?

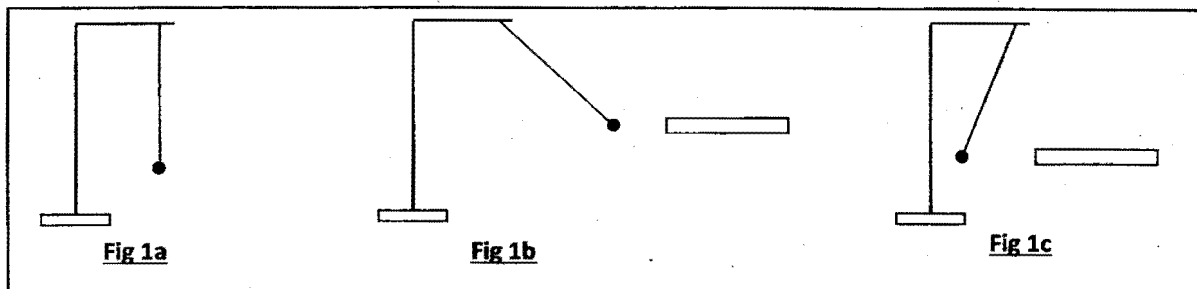
*L'indépendance de  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  par rapport au temps en électrostatique et en magnétostatique explique historiquement que l'étude de l'électrostatique et l'étude du magnétisme se sont développées indépendamment l'une de l'autre.*

## Partie II : Electrostatique (30 points)

*Une des propriétés importantes de l'électrostatique est que des charges électriques immobiles interagissent avec d'autres charges par l'intermédiaire d'un vecteur champ électrique  $\vec{E}$ .*

### II-1- Loi de Coulomb - Champ crée par une charge ponctuelle.

II-1-1- Un pendule électrostatique (fig1a) est formé d'une petite boule métallisée très légère, suspendue à un fil isolant inextensible. Lorsqu'on approche de la boule du pendule non chargé (fig1a) un bâton de verre frotté avec de la laine, la boule est attirée ( fig 1b ) ; après contact il y a répulsion ( fig1c).



Interpréter ces observations.

II-1-2 - Soient deux particules de charges électriques  $q_0$  et  $q$  et ayant des masses respectives  $m_0$  et  $m$ , placées en deux points  $P_0$  et  $P$  d'un espace physique de permittivité  $\epsilon_0$ .

Soit le vecteur  $\vec{r} = \overrightarrow{P_0P} = r\vec{u}$  avec :  $\vec{u} = \frac{\overrightarrow{P_0P}}{\|\overrightarrow{P_0P}\|}$

(vecteur unitaire).

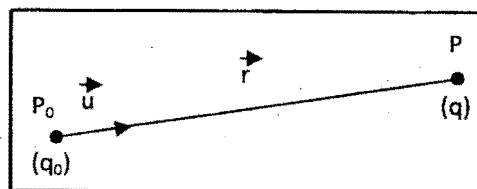
D'après la loi de Coulomb (1780) la force électrostatique exercée par la particule placée en  $P_0$  sur la particule placée en  $P$  est donnée par l'expression vectorielle :  $\vec{f}_e = k \frac{q_0q}{r^2} \vec{u}$  avec

$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.10^9$  dans le système international d'unités.

II-1-2-1- Donner l'expression vectorielle de la force  $\vec{f}_e'$  exercée par  $q$  sur  $q_0$ .

-Représenter schématiquement les deux vecteurs forces dans les cas où les charges  $q_0$  et  $q$  sont des charges positives ou négatives et dans le cas où la charge  $q_0$  est positive et  $q$  négative.

II-1-2-2 – Donner l'expression des modules de  $\vec{f}_e$  et de  $\vec{f}_e'$ .



**II-1-3-** La force gravitationnelle exercée par une masse  $m_0$  sur une masse  $m$  placées respectivement aux points  $P_0$  et  $P$  est notée :  $\vec{f}_g = -G \frac{m_0 m}{r^2} \vec{u}$  ; avec  $G$  : constante de gravitation universelle  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2 \text{ kg}^{-2}$ .

On écrit  $\vec{f}_g = m\vec{G}$  pour la force gravitationnelle s'exerçant sur la masse  $m$  et  $\vec{f}_e = q\vec{E}$  pour la force électrique s'exerçant sur la charge  $q$ .

**II-1-3-1-** Donner les expressions de  $\vec{G}$  et  $\vec{E}$  appelés respectivement champ gravitationnel et champ électrique créés par la masse  $m_0$  et par la charge  $q_0$  au point  $P$ .

**II-1-3-2-** Indiquer la similitude entre les deux champs.

**II-1-4-** On considère le modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène : il est composé d'un noyau central ponctuel supposé fixe contenant un proton de charge  $+e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  et de masse  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ , autour du quel gravite suivant une trajectoire circulaire un électron de masse  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  et de charge  $-e$ .

**II-1-4-1-** Faire un schéma annoté de l'atome d'hydrogène dans cette hypothèse de Bohr.

**II-1-4-2-** Donner les caractéristiques du vecteur champ électrostatique créé par le proton (noyau de l'atome d'hydrogène) en un point distant de  $r_0 = 53,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}$  (rayon de la première orbite de Bohr). On rappelle :  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ S.I}$

**II-1-4-3-** Dédurre de la question précédente les caractéristiques de la force électrostatique qui agit sur l'électron qui tourne à la distance  $r_0 = 53,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}$  autour du proton.

**II-1-4-4-** Calculer l'intensité de la force d'interaction gravitationnelle entre les deux particules et la comparer à l'intensité de la force électrostatique.

Dans l'étude classique du mouvement de l'électron autour du proton, est-il justifié de ne tenir compte que de la force électrostatique ? Justifier votre réponse.

**II-2 : Champ électrostatique créé par une distribution de charges électriques.**

**II-2-1-** Deux charges ponctuelles  $-q$  et  $+q$  sont placées en deux points  $A$  et  $B$  d'abscisses respectives  $-a$  et  $+a$  sur un axe  $Ox$  de vecteur unitaire  $\vec{i}$ .

Représenter les vecteurs champs électrostatiques résultants créés par ces deux charges et donner leurs expressions aux points  $M$  et  $M'$  de l'axe  $Ox$  d'abscisses  $x$  respectives telles :

$0 \leq x < a$  et  $x > a$ .

**II-2-2 -** Donner le module du vecteur champ électrostatique résultant en fonction de  $\epsilon_0$ ,  $q$  et  $a$  dans le cas particulier où  $x = 0$ .

**II-2-3-** On considère maintenant une distribution linéaire de charges avec une densité linéaire constante  $\lambda$  sur un fil de longueur  $FF' = 2\ell$ . L'élément de longueur  $d\ell$  de ce fil porte une charge  $dq = \lambda d\ell$ .

**II-2-3-1-** Donner l'expression du champ élémentaire  $d\vec{E}$  créé par la charge élémentaire  $dq$  en un point  $B$  situé sur un axe  $Ox$  perpendiculaire au fil et passant par le milieu  $O$  du segment  $FF'$ . On notera  $\|\vec{OB}\| = a$  dans la suite.

-Faire un schéma où on fera figurer le fil  $FF'$ , l'axe  $Ox$ , le point  $B$  et le champ élémentaire  $d\vec{E}$ . On considère  $\lambda$  positive et que le fil est placé sur l'axe  $Oy$ .

**II-2-3-2-** Donner l'expression du champ  $\vec{E}$  créé par le segment  $FF'$  chargé en fonction de  $\ell$ ,  $\lambda$ ,  $a$ ,  $\epsilon_0$  et de  $\vec{i} = \frac{\vec{OB}}{\|\vec{OB}\|}$  et en déduire son expression lorsque le fil est infiniment long.

**II-3- Potentiel et champ électrostatiques créés par un dipôle électrique.**

Un dipôle électrique est un système formé de deux charges ponctuelles égales en valeur absolue et de signes contraires :  $-q$  et  $+q$ , distantes de  $a$ . Ce système qu'on considère rigidement lié et simplifié décrit le comportement électrique des molécules hétéro-polaires.



**II-3-1** On considère le dipôle électrique schématisé ci-dessous.

Le potentiel électrique créé par la charge  $-q$  au point M est  $V_{AM} = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0\|\vec{MA}\|}$  et le potentiel créé par la charge  $+q$  au point M est  $V_{BM} = +\frac{q}{4\pi\epsilon_0\|\vec{MB}\|}$ .

Le point O origine du repère est le milieu du segment AB.

Montrer que le dipôle crée au point M un potentiel :  $V_M = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{\|\vec{MA}\| - \|\vec{MB}\|}{\|\vec{MA}\|\|\vec{MB}\|} \right]$

**II-3-2-** Montrer que :

$$\|\vec{MA}\| - \|\vec{MB}\| = \frac{2\vec{AB} \cdot \vec{OM}}{\|\vec{MA}\| + \|\vec{MB}\|}$$

**II-3-3-** Par hypothèse, le point M est très éloigné du dipôle (figure ci-contre) et donc  $a \ll r$  et on prendra

$$\|\vec{MA}\| \approx \|\vec{MB}\| \approx r;$$

Montrer que :  $V_M = \frac{\|\vec{p}\| \cos\theta}{4\pi\epsilon_0 r^2}$  avec  $\vec{p} = q\vec{AB}$  est le

moment électrique du dipôle ; soit  $\|\vec{p}\| = q\|\vec{AB}\| = qa$

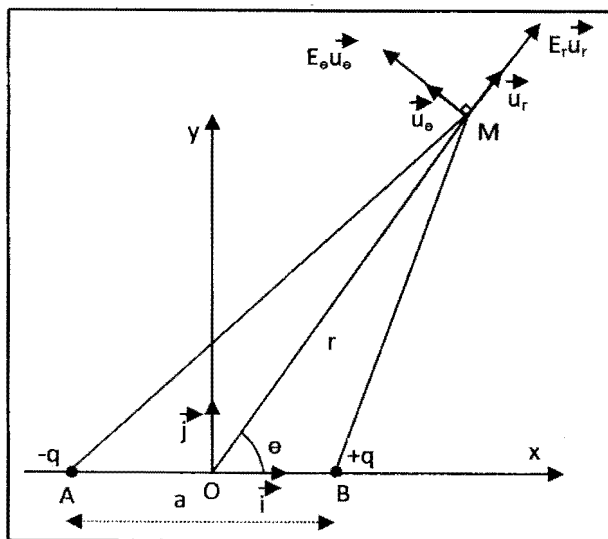
**II-3-4-** Le champ électrique créé par un dipôle

électrique au point M est  $\vec{E} = E_r \vec{u}_r + E_\theta \vec{u}_\theta$  ;

$$\vec{E} = -\frac{\partial V_M}{\partial r} \vec{u}_r - \frac{1}{r} \frac{\partial V_M}{\partial \theta} \vec{u}_\theta ;$$

donner les expressions de  $E_r$  et  $E_\theta$  en fonction de  $\|\vec{p}\|$ ,  $\theta$ ,  $r$  et  $\epsilon_0$

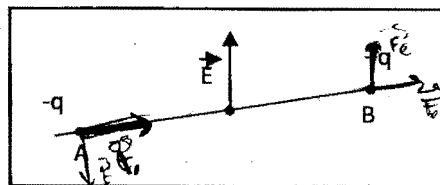
Rappel :  $\frac{\partial F}{\partial x}$  = dérivée de la fonction F par rapport à la variable x.



**II-4 – Action d’un champ électrostatique uniforme sur un dipôle électrique**

Soit un dipôle AB placé dans un champ électrique uniforme  $\vec{E}$  créé par un autre système de charges comme le montre la figure suivante :

**II-4-1-** Reproduire le schéma et représenter les deux forces électriques agissant sur les deux charges du dipôle.



**II-4-2-** Montrer que le moment des forces auquel est soumis ce dipôle par rapport à un axe  $\Delta$  passant par O et perpendiculaire au plan contenant le dipôle est :  $\vec{M} = \vec{p} \wedge \vec{E}$  ; le moment du dipôle électrique est  $\vec{p} = q\vec{AB}$

**II-4-3-** Etudier les conditions d’équilibre d’un dipôle placé dans le champ électrique  $\vec{E}$ .

**II-4-4-** La molécule d’eau est un exemple de molécule hétéro-polaire qu’on peut représenter par un dipôle électrique (permanent) de charges  $-q$  et  $+q$  distantes de  $a$  et de moment dipolaire  $\vec{p}$  ; avec  $\|\vec{p}\| = 6,2 \cdot 10^{-30} \text{C.m}$  (Coulomb-mètre).

**II-4-4-1-** On introduit des molécules de chlorure d’hydrogène dans l’eau, donner une explication simple de la dissociation de ces molécules.

**II-4-4-2-** Comment pourrait-on expliquer la solvation des ions positifs tels que :  $H^+$ ,  $Cu^{2+}$

**II-4-4-3-** En prenant  $+q = 10e$ , déterminer la distance  $a$  entre le centre de gravité  $G^+$  des charges positives et  $G^-$  centre de gravité des charges négatives de la molécule d’eau.

- Comparer le résultat trouvé avec la valeur 0,0038 nm indiquée dans la littérature.
- La valeur absolue de la charge de l’électron  $e = 1,610^{-19} \text{C}$

### Partie III : Electrocinétiq ue (15points)

Le courant électrique est dû à un mouvement d'ensemble ordonné de particules chargées soumises à un champ électrique  $\vec{E}$ .

#### III-1- Mécanisme de conduction du courant électrique dans les métaux (cas des courants continus).

Nous allons étudier le mouvement d'ensemble des électrons libres dans un fil métallique. Lorsqu'un fil métallique est relié à un générateur celui-ci crée un champ électrique uniforme  $\vec{E}$  à l'intérieur du métal.

Le métal qui constitue le fil contient  $p$  électrons libres par  $m^3$ . Le fil supposé cylindrique a pour section  $s$  ( $m^2$ ). L'intensité du courant qui le parcourt est  $I$  (en A).

Les électrons libres progressent à la vitesse moyenne  $V$  ( $m.s^{-1}$ ) car le régime transitoire s'amortit très rapidement.

III-1-1- Exprimer le nombre  $N$  d'électrons libres contenus dans une portion du fil de longueur  $\ell$  en fonction de  $p$ ,  $\ell$  et  $s$ . En déduire l'expression de la charge  $Q$  mobile dans ce fil.

III-1-2- Faire le schéma du fil relié à un générateur de tension continue. Montrer une vue intérieure du métal en indiquant par des flèches le champ électrique et le mouvement d'ensemble des électrons. Les électrons seront représentés par des points. Comparer le sens du mouvement des électrons avec le sens conventionnel donné au courant électrique.

III-1-3- Exprimer en fonction de  $\ell$  et  $V$ , le temps  $t$  mis par ces  $N$  électrons libres pour traverser toutes les sections du fil.

III-1-4- Montrer que l'intensité du courant peut s'écrire :  $I = pesV$ .

III-1-5- On suppose que dans son mouvement sous l'effet du champ électrique  $\vec{E}$  que l'électron est soumis à une force de frottement  $\vec{f} = -m_e\lambda\vec{v}$ ; relation où  $m_e$  est la masse de l'électron et  $\lambda$  une constante positive.

III-1-5-1- Donner l'unité de  $\lambda$ .

III-1-5-2- Soit  $V$  la vitesse limite atteinte par l'électron au bout d'un court intervalle de temps ; en appliquant la relation fondamentale de la dynamique à l'électron soumis au champ électrostatique  $\vec{E}$  créé par le générateur et à  $\vec{f}$ , établir que  $\vec{V} = -\frac{e}{m_e\lambda}\vec{E} = -k\vec{E}$  avec  $k = \frac{e}{m_e\lambda}$

III-1-5-3- Des questions III-1-4 et III-1-5-2, déduire l'expression de l'intensité  $I$  du courant en fonction de  $\|\vec{E}\|$ ,  $e$ ,  $m_e$ ,  $\lambda$ ,  $p$  et  $s$ .

III-1-6- On appelle  $V_A - V_B$  la différence de potentiel entre deux points A et B du fil. Ces points sont reliés respectivement aux pôles positif et négatif du générateur. Exprimer  $E = \|\vec{E}\|$  en fonction de  $V_A - V_B$  et  $\ell$ ;  $\vec{E}$  est constant à l'intérieur du métal.

III-1-7. Montrer que  $V_A - V_B = K \cdot I$ ;  $K$  étant une constante dépendant des caractéristiques du conducteur et de l'électron. Que signifie cette relation? Donner l'expression de cette constante  $K$  et son unité.

#### III-2-Mécanisme de conduction du courant électrique dans les électrolytes.

III-2-1- Rappeler ce qu'on appelle un électrolyte.

III-2-2- Soit un électrolyseur contenant une solution de chlorure de sodium Na Cl, dans laquelle on plonge deux électrodes constituées par deux plans A et B de surface  $S$  et distants de  $\ell$ . Ces électrodes (inattaquables) sont reliées respectivement aux pôles positif et négatif

d'un générateur de tension continue par des fils de connexion et on insère dans le circuit un résistor.

III-2-2-1- Faire le schéma de ce type de montage.

III-2-2-2- Quelle est l'utilité du résistor ?

II-2-2-3- On ferme le circuit :

II-2-2-3-1- schématiser le mouvement des ions à l'intérieur de la cuve.

Les ions acquièrent des vitesses moyennes  $\vec{V}_{moy}^{\pm} = -k_{\pm}\vec{E}$  avec  $k_{\pm}$  : mobilité des ions positifs ou négatifs ;

III-2-2-3-2- montrer par un schéma sur une section traversée par les ions que l'intensité du courant est  $I = I^+ + I^-$ . Avec  $I^+$  : intensité engendrée par le mouvement des ions positifs et  $I^-$  : intensité engendrée par le mouvement des ions négatifs ;

III-2-2-3-3 établir que  $I = pes(k_+ + k_-)(\frac{V_A - V_B}{\ell})$  avec  $p$  = la concentration moléculaire de la solution ( $p$  = nombre de molécules NaCl par  $m^3$ ),  $\ell$  : la distance entre les deux électrodes et  $s$  : la surface commune des électrodes ;

Application numérique : calculer  $I$  pour une solution de 0,1M de NaCl . On donne  $k_-$  de  $Cl^- = 8.10^{-8}m^2V^{-1}s^{-1}$ ,  $k_+$  de  $Na^+ = 4,8.10^{-8}m^2V^{-1}s^{-1}$ ,  $\ell = 10cm$ ,  $s = 5cm^2$ , le nombre d'Avogadro  $N = 6,02.10^{23}mol^{-1}$ , charge de l'électron en valeur absolue  $e = 1,6.10^{-19}C$  et  $V_A - V_B = 5V$  ;

III-2-2-3-4- on définit la conductivité électrique de l'électrolyte par la relation

$$\Upsilon = pe(k_+ + k_-) :$$

- calculer la résistivité de la solution de chlorure de sodium avec les données précédentes.
- expliquer pourquoi la pureté ionique de l'eau se mesure avec un ohmmètre.

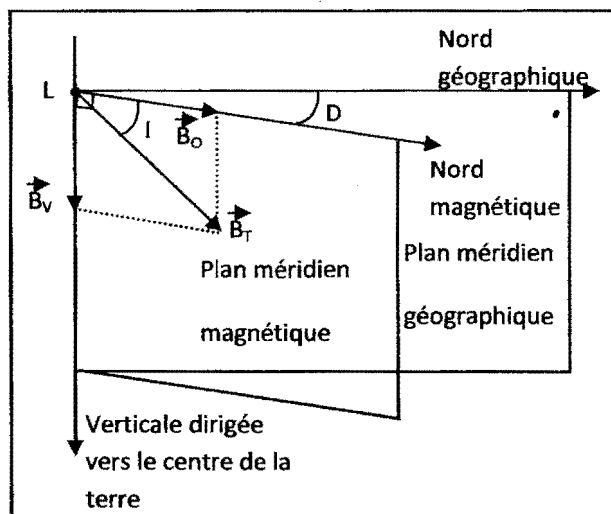
## PARTIE IV : Sources de Champs magnétiques (15points)

Les physiciens Rowland (1876) et Oersted (1820) ont montré expérimentalement que le champ magnétique a pour origine l'existence des particules électriquement chargées en mouvement.

### IV-1 : Champ magnétique terrestre

La terre, comme les autres corps célestes (le soleil par exemple) possède un champ magnétique.

La théorie actuellement retenue (Elsasser Bullard 1950) prétend que le champ magnétique terrestre est dû aux mouvements de la matière conductrice (nickel, fer) en fusion qui constitue le noyau terrestre.



Sur le schéma ci-dessus sont représentés le plan du méridien magnétique et celui du méridien géographique ainsi que le vecteur champ magnétique terrestre  $\vec{B}_T$ .

Soient  $\vec{B}_0$  et  $\vec{B}_v$ , respectivement, les composantes horizontale et verticale du champ magnétique terrestre  $\vec{B}_T$ .

IV-1-1-A partir du schéma représentant le champ magnétique terrestre  $\vec{B}_T$  ci-dessus : définir les mots suivants : Déclinaison magnétique (D) ; Inclinaison (I) ; plan méridien magnétique.

IV-1-2- I et D varient selon le lieu et la date d'observation.

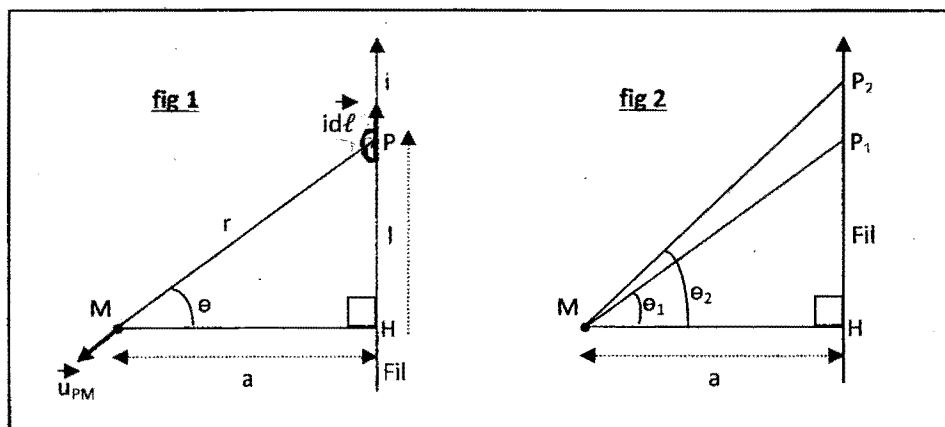
A la date du 1<sup>er</sup> juillet 1980 en un lieu L, la mesure de I donne  $63^\circ 40'$  ; calculer l'intensité  $B_T$  en ce lieu et à cette date si  $\|\vec{B}_0\| = B_0 \approx 2.10^{-5}$  Tesla.

IV-1-3- Décrire une boussole ; comment s'oriente-t-elle à la surface de la terre ? Indiquer son utilité.

**IV- 2 – Magnétostatique : Etude des Champs magnétiques créés par des circuits simples à courant constant.**

**IV-2-1- Champ d'induction magnétique créé par un courant rectiligne.**

D'après la loi de Biot et Savart le champ magnétique élémentaire créé en un point M par un élément de courant  $id\vec{\ell}$  placé au point P est  $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{id\vec{\ell} \wedge \vec{u}_{PM}}{r^2}$ , avec  $\vec{u}_{PM}$  : vecteur unitaire  
Voir figure ci-dessous.



IV-2-1-1- Reproduire ce schéma (fig1) et en

utilisant les règles du produit vectoriel, donner la direction et le sens de  $d\vec{B}$  et de  $\vec{B}$  de manière générale qu'on représentera sur le schéma.

IV-2-1-2- Montrer que :  $\|d\vec{B}\| = \frac{\mu_0 id\ell}{4\pi r^2} \cos\theta$ .

IV-2-1-3- En considérant le triangle rectangle MHP montrer que  $d\ell = \frac{ad\theta}{\cos^2(\theta)}$  et en déduire l'expression du module du champ magnétique  $\|\vec{B}\|$  créé par un fil de longueur finie  $P_1 P_2$  (fig2) en fonction de I,  $\mu_0$ , a,  $\theta_1$  et  $\theta_2$ .

IV-2-1-4- De la question précédente, déterminer le module du champ magnétique créé par un fil supposé infiniment long. Application numérique :  $I = 5A$ ,  $a = 0,5m$  et  $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ .

Comparer cette valeur à la valeur  $B_0 = 2.10^{-5}T$  de la composante horizontale du champ magnétique terrestre en un lieu considéré et à la date d'observation.

**IV- 2-2- Champ d'induction magnétique créé par des courants circulaires**

L'application de la loi de Biot et Savart permet de montrer que le champ magnétique au centre d'une bobine cylindrique de longueur  $\ell$ , de rayon r, comportant N spires et parcouru par un courant d'intensité I a pour valeur  $B = \mu_0 \frac{NI}{\sqrt{\ell^2 + 4r^2}}$

IV-2-2-1- Calculer B pour  $N = 100$ ,  $\ell = 2r = 10cm$ ,  $I = 10 A$  et  $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$  (SI)

IV-2-2-2- Retrouver la formule donnant B au centre d'une bobine plate à partir de la formule générale précédente.

IV-2-2-3- Montrer que pour une bobine longue ( $\ell \gg r$ ) on retrouve la formule  $B = \mu_0 nI$  pour un solénoïde infiniment long, avec  $n$  = nombre de spires par unité de longueur.

IV-2-2-4- Déterminer à partir de quelle valeur du rapport  $\frac{\ell}{r}$ , le champ au centre d'une bobine de longueur  $\ell$  ne diffère que de 1% de celui que l'on calculerait en considérant la bobine comme un solénoïde comportant le même nombre de spires par mètre.

## Partie V: Induction électromagnétique (15points)

*Ampère (et autres) ayant montré qu'un courant électrique crée un champ magnétique (1820), les savants d'alors s'attaquèrent à un problème inverse : un champ magnétique peut-il engendrer un courant électrique ?*

*Avec sept ans d'effort (1824-1831) le jeune anglais Michel Faraday énonça clairement les lois de l'induction magnétique qui a été par la suite le principe de base de fonctionnement des générateurs électriques, des transformateurs et de nombreux dispositifs d'usage quotidien.*

### V-1 – Mise en évidence de l'induction magnétique

V-1-1- Des expériences du phénomène d'induction sont schématisées et leurs résultats sont indiqués sur le Document joint en annexe. Donner une interprétation à chacun des résultats observés.

V-1-2- Dire de manière générale quelle est l'origine de l'apparition d'un courant induit dans un circuit fermé et d'une force électromotrice d'induction dans le cas d'un circuit ouvert :

On rappellera simplement la loi de Faraday.

V-1-3- Préciser les éléments appelés inducteurs et induits dans chaque cas du document.

### V-2-: Production du courant alternatif.

Le phénomène donnant l'induction électromagnétique a une importance pratique considérable : la quasi-totalité de l'énergie électrique que nous utilisons nous vient des générateurs électriques par induction (dynamos, et surtout alternateurs).

On fait tourner à vitesse constante une bobine plate de surface  $S$  comportant  $N$  spires, autour de l'axe  $Y'Y$ . Pendant la rotation, le cadre de la bobine est plongé dans les lignes de champ magnétique  $\vec{B}$  créé par un autre système (aimant ou courant).

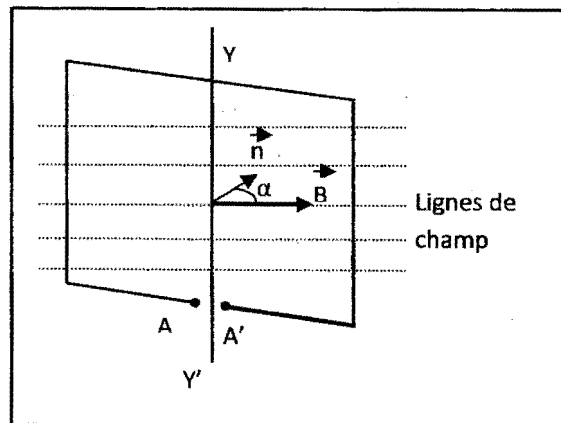
L'angle  $\alpha$  que fait  $\vec{B}$  avec  $\vec{n}$  vecteur unitaire de la normale à la bobine est une fonction linéaire du temps :  $\alpha = \omega t$ ,  
 $\omega$  = vitesse de rotation de la bobine.

V-2-1- Pendant la rotation de la bobine, on constate l'apparition d'une force électromotrice d'induction entre A et A'. Expliquer ce phénomène.

V-2-2- Donner l'expression du flux instantané  $\Phi$  créé par  $\vec{B}$  à travers la bobine en fonction de  $N$ ,  $B$ ,  $S$  et  $\omega$ .

V-2-3- Donner l'expression de la force électromotrice d'induction notée  $e$ . Application numérique : Calculer  $e$  pour  $N = 100$  spires,  $S = 10 \text{ cm}^2$ ,  $B = 4000$  micro teslas ( $4000 \mu\text{T}$ ) et  $\omega = 120$  tours par minute.

V-2-4- Que peut-on dire de la tension délivrée par un tel générateur entre ses bornes A et A' ?

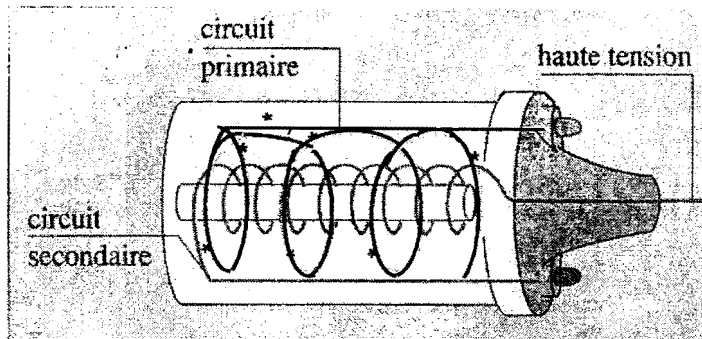




**V-2-5-** Les générateurs industriels sont constitués comme suit : l'inducteur est un électro-aimant mobile et le cadre (circuit induit) est fixe. En considérant que la fréquence du courant industriel est de 50 Hz quelle est la vitesse de rotation de ces électro-aimants ?

### V-3 - L'électricité dans l'automobile – la bobine d'allumage.

La bobine d'allumage est un transformateur permettant de produire la haute tension appliquée, à des instants déterminés, entre les électrodes des bougies. Ces électrodes sont séparées d'une distance comprise entre 0,4 mm et 0,8 mm. L'étincelle éclate entre les deux électrodes au moment opportun sous l'effet de cette haute tension généralement de l'ordre de 15 kV à 40 kV.



Le transformateur est constitué de deux enroulements distincts disposés autour d'un même noyau de fer : un enroulement primaire d'une centaine de spires et un enroulement secondaire comportant 10000 à 30000 spires (figure ci-dessus).

Le circuit primaire est alimenté par une batterie sous une tension de 12 V.

**V-3-1** Expliquer l'utilité du noyau de fer dans la constitution du transformateur.

**V-3-2** Une tension constante ne permet pas de faire fonctionner un transformateur donc de produire une étincelle au niveau des électrodes. La production d'étincelles a lieu à l'ouverture ou à la fermeture du circuit primaire de la bobine.

- Comment varie le flux qui donne naissance à cette production de la haute tension au cours de chacune de ces deux opérations ?
- Comment appelle-t-on cette tension qui apparaît au niveau des électrodes ?
- La production d'étincelles au niveau des électrodes est-elle due à l'effet Joule ou à un autre effet du courant électrique et indiquer son utilité.

## Partie VI - Les ondes électromagnétiques : ondes hertziennes et ondes lumineuses (20 points).

*Une charge électrique au repos produit seulement un champ électrique, tandis qu'une charge en mouvement produit à la fois un champ électrique  $\vec{E}$  et un champ magnétique  $\vec{B}$  associés.*

*Les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  dépendent du temps et de l'espace et constituent deux aspects d'une propriété fondamentale de la matière. On utilise le terme champ électromagnétique (champ électrique et champ magnétique combinés) pour décrire la situation mettant en jeu les charges électriques en mouvement. Les ondes électromagnétiques sont des ondes associées à la propagation de ce champ électromagnétique. Le domaine de fréquences de ces ondes s'étale environ de  $10^{22}$  Hz (Rayons Gamma) à quelques dizaines de Hz (circuit en courant alternatif) y compris les ondes hertziennes et le rayonnement visible. Elles obéissent toutes aux lois fondamentales de l'électromagnétisme formulées par les équations de Maxwell.*

### VI-1 Circuit oscillant

Avec les machines tournantes ( voir exercice production de courant alternatif), il est difficile de réaliser de très grandes vitesses de rotation. Ainsi pour obtenir des courants de hautes fréquences (pour la communication radioélectrique), il faut utiliser des circuits oscillants (L,C) entretenus dont la fréquence des oscillations est donnée par la formule de Thomson :

$$\frac{1}{v} = 2\pi\sqrt{LC}.$$

On considère ici le cas où les oscillations sont entretenues et qu'il y n'a pas de perte d'énergie par effet Joule.

Le circuit oscillant est constitué d'une bobine d'auto-inductance  $L$ , de résistance supposée nulle et d'un condensateur de Capacité  $C$ . Le condensateur initialement chargé sous une tension  $U$  porte une charge électrique  $Q_0$ .

VI-1-1- Faire le schéma de ce circuit.

VI-1-2- Etablir l'équation différentielle liant  $q$  (charge du condensateur à l'instant  $t$ ),

$\ddot{q}$  ( $\frac{d^2q}{dt^2}$  : dérivée seconde de  $q$ ),  $L$  et  $C$

VI-1-3- Donner les expressions de la charge  $q = f(t)$  et de l'intensité  $i = g(t)$ .

Application numérique :  $C = 50\mu\text{F}$  ;  $L = 2\text{H}$  ;  $U = 20\text{V}$ . Et à  $t = 0$  :  $Q_0 = CU$  et  $i = 0$

Quelle est la valeur de la fréquence propre de ce circuit ?

VI-1-4-Montrer que ce système satisfait au principe de conservation de l'énergie.

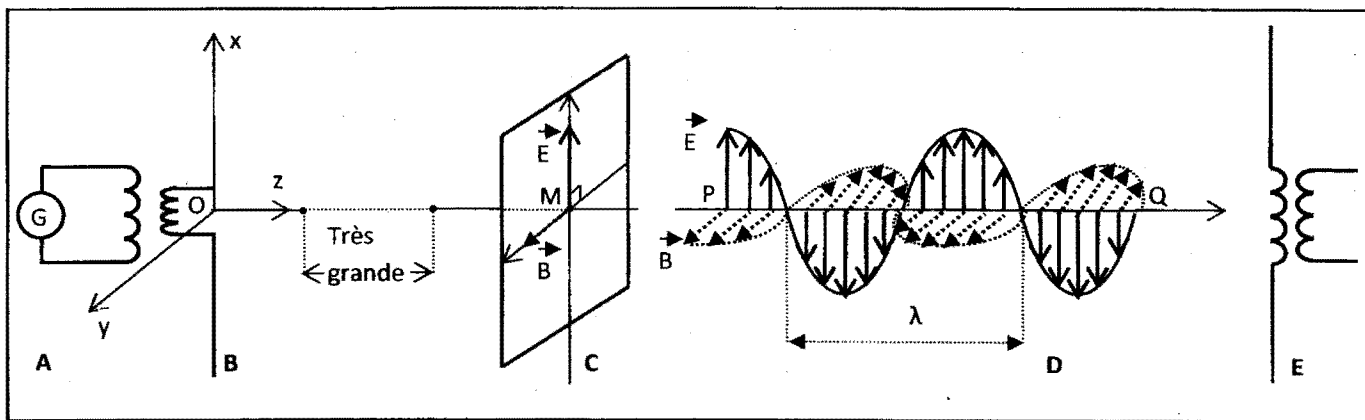
## VI-2 Ondes hertziennes : Propagation – Réception et Equations de Maxwell

A partir du 19<sup>e</sup> siècle l'allemand Hertz montre que des oscillations électriques peuvent se propager dans l'espace : elles constituent les ondes Hertziennes. Ce sont des ondes électromagnétiques dont les fréquences des sources émettrices s'échelonnent de 10kHz à 300GHz. Si votre téléphone portable sonne c'est que son antenne a détecté un champ électromagnétique.

VI-2-1- Emission d'ondes hertziennes par un oscillateur LC (cas d'une onde plane polarisée rectilignement).

A partir d'un circuit fermé  $L, C$ , l'énergie ne peut être recueillie que sous forme de chaleur.

Par contre pour un montage branché sur un réseau d'antennes, l'énergie peut être également libérée sous forme de rayonnement. Les charges électriques oscillant dans l'antenne B (voir fig. ci-dessous) créent dans le milieu environnant un champ magnétique  $\vec{B}$  et un champ électrique  $\vec{E}$  alternatifs : On dit qu'il règne un champ électromagnétique dans cet espace ou une onde hertzienne. Le point O est le centre du dipôle oscillant.



La figure ci-dessus à laquelle on adjoint souvent un amplificateur constitue un modèle de dispositif d'émission, de mode de propagation et de dispositif récepteur d'une onde hertzienne.

Légende :

A : Circuit oscillant qui génère une tension de haute fréquence, B : Antenne émettrice, C : Structure de l'onde électromagnétique ( $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ ) à grande distance de l'antenne, D : forme de variation de  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  et E : antenne réceptrice couplée au circuit récepteur,

VI-2-1-1- En un point M quelconque (voir figure ci-dessus) de l'espace et à chaque instant il y a coexistence d'un champ électrique  $\vec{E}$  et d'un champ d'induction magnétique  $\vec{B}$ .

(  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  variant mutuellement).

-D'après la figure, préciser la direction de  $\vec{E}$  par rapport à celle  $\vec{B}$  et indiquer comment sont les directions de  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  par rapport à la direction de propagation définie par Oz?

VI-2-1-2- L'axe Oz a pour vecteur unitaire  $\vec{e}_z$  et pour origine O. On donne :

$\vec{E}(z,t) = E_0 \cos \omega (t - \frac{z}{c}) \vec{e}_x$  avec  $\omega$  : pulsation de l'oscillateur = pulsation de l'onde émise.

D'après la théorie de Maxwell :  $\vec{B} = \frac{1}{c} (\vec{e}_z \wedge \vec{E})$  donner l'expression de  $\vec{B}$  au point M tel OM=z. En déduire que  $\|\vec{E}\| = c \|\vec{B}\|$  ; c : célérité de la lumière.

VI-2-1-3 On définit dans la direction de propagation le vecteur  $\vec{k} = k \vec{e}_z$  ; avec  $\|\vec{k}\| = \frac{2\pi}{\lambda}$  ;  $\vec{k}$  est appelé vecteur d'onde.

A partir du schéma et des données ci-dessus retrouver les équations de Maxwell écrites sous la forme suivante:  $\vec{k} \cdot \vec{E} = 0$  ;  $\vec{k} \cdot \vec{B} = 0$  ;  $\vec{k} \wedge \vec{E} = \omega \vec{B}$  ,  $\vec{k} \wedge \vec{B} = -\epsilon_0 \mu_0 \omega \vec{E}$  pour une onde électromagnétique plane polarisée rectilignement se propageant dans le vide. On rappelle que :  $\mu_0$  et  $\epsilon_0$  sont respectivement la perméabilité magnétique et la permittivité diélectrique du vide et que  $\mu_0 \epsilon_0 c^2 = 1$ . En déduire que ces équations admettent que  $k^2 = \mu_0 \epsilon_0 \omega^2$ .

VI-2-1-4- On définit le vecteur de Poynting par  $\vec{P} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \wedge \vec{B})$ , donner l'expression de  $\vec{P}$  en fonction de  $\|\vec{E}\|$ ,  $\epsilon_0$ , c et de  $\vec{e}_z$ .

La densité d'énergie électromagnétique par unité de volume rayonnée par le dipôle est

$\rho = \frac{\|\vec{P}\|}{c}$ , exprimer  $\rho$  en fonction de  $\|\vec{E}\|$  et  $\epsilon_0$  d'une part et en fonction de  $\|\vec{B}\|$  et  $\mu_0$  d'autre part.

### VI-2-2 : Le téléphone mobile.

Le texte qui suit est extrait d'un livre de physique édité il y a quelques années.

#### Le téléphone mobile : comment ça marche ?

Lorsqu'un appel est émis par un téléphone mobile il est transmis par l'antenne couvrant le secteur géographique, la cellule, dans lequel il se trouve.

Par définition le mobile se déplace et la liaison entre lui et l'émetteur est souvent obstrué (bâtiments, arbres, véhicules,...)

A un instant donné, une onde est émise par l'antenne de la cellule dans toutes les directions, à la recherche du mobile qui reconnaîtra son code d'identification.

Les différentes composantes de l'onde se heurtent à des obstacles variés et prennent alors des trajets multiples et subissent réflexion, diffraction, transmission, diffusion.

Au final, l'onde se recompose sur l'antenne du mobile avec des affaiblissements dus aux incidents de parcours et des décalages dans le temps plus ou moins importants. Cette propagation (multi-trajet) entraîne des perturbations du signal, des interférences aux échos et des coupures.

C'est pourquoi les téléphones mobiles sont équipés de dispositifs complexes pour remédier cette baisse de qualité du signal reçu.

Le mobile de troisième génération commence à pointer le bout du nez. La troisième génération, UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) consacrera le multimedia. Avec ce portable l'utilisateur appellera aux 4 coins du monde sans changer de terminal. L'appel circulera, via les réseaux cellulaires terrestres. La communication par satellite bouchera les trous de la couverture dans les zones peu rentables ou difficiles à équiper.

Par ailleurs l'appareil aura un débit tel que pourront être acheminées outre la voie humaine, des images (visiophones, photos), des données (agendas électroniques, fax, messagerie, e-mail) et une liaison Internet satisfaisante. En pratique, ces dispositifs utiliseront de nouvelles bandes de fréquences autour de 2 GHz, bien distincts des 900 MHz et 1800 MHz du GSM actuel.



VI-2-2-1 Les termes soulignés dans le texte correspondent à des phénomènes caractéristiques des ondes. Donner une définition précise et concise de chaque phénomène.

VI-2-2-2 Expliquer brièvement en quoi consiste la communication par satellite.

VI-2-2-3 Quel commentaire suscite le dernier paragraphe de cet extrait ?

VI-2-2-4- Quel est l'ordre de grandeur de la fréquence des ondes utilisées pour les téléphones portables de troisième génération ? En déduire l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. La célérité de la lumière dans le vide  $c = 3.10^8 \text{ms}^{-1}$ .

### VI-3-Les ondes lumineuses – interférences lumineuses.

*La lumière est l'ensemble des ondes électromagnétiques auxquelles l'œil humain normal est sensible. Les effets photochimiques, physiologiques et photoélectriques (dans une moindre mesure) de la lumière sont précisément déterminés par le vecteur  $\vec{E}$  ; pour cette raison on ne considérera que le vecteur champ électrique  $\vec{E}$  dans le cas de la formation d'interférences d'une onde plane lumineuse. La région visible des ondes électromagnétiques correspond au domaine de fréquences  $\nu$  pour lequel :  $3,75 \cdot 10^{14} \text{Hz} \leq \nu \leq 7,5 \cdot 10^{14} \text{Hz}$ .*

#### Interférences des ondes lumineuses.

Avec une source de lumière unique et un dispositif interférentiel (les miroirs de Fresnel, bi prisme de Fresnel, fentes de Young...) qui divise l'onde incidente issue de cette source en deux ou plusieurs ondes, après avoir parcouru des chemins différents, ces ondes en se superposant donnent des interférences.

VI-3-1- Faire un schéma annoté du dispositif expérimental des fentes de Young permettant d'observer des interférences lumineuses avec une source monochromatique.

VI-3-2- Donner le caractère de la lumière qui est mis en évidence par le phénomène d'interférences lumineuses.

VI-3-3- Les vibrations lumineuses émises par deux sources synchrones et rigoureusement monochromatiques  $S_1$  et  $S_2$  sont, à un instant  $t$  en un point  $M$  de l'écran distant des sources de :  $S_1M = d_1$  et  $S_2M = d_2$  définies par les champs suivants :  $\vec{E}_1 = \vec{e}_z E_{01} \cos(\omega t - kd_1)$  et  $\vec{E}_2 = \vec{e}_z E_{02} \cos(\omega t - kd_2)$  ; avec  $\vec{e}_z$  : vecteur unitaire de l'axe OZ contenu dans le plan d'observation des interférences.  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\vec{k}$  : vecteur d'onde.

La vibration résultante au point  $M$  est définie par le champ  $\vec{E}(M,t) = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ .

VI-3-3-1- On pose que  $\vec{E}(M, t) = \vec{e}_z E \cos(\omega t - \varphi)$ , exprimer l'amplitude  $E$  et la phase  $\varphi$  du champ électrique résultant  $\vec{E}(M,t)$  en fonction des paramètres des deux champs superposés.

VI-3-3-2- On définit l'éclairement au point  $M$  par  $\mathcal{E}(M) = E^2$ . Exprimer l'éclairement  $\mathcal{E}(M)$  en fonction de  $E_{01}, E_{02}$ ,  $k$ ,  $d_1$  et  $d_2$ .

VI-3-3-3- On définit le contraste de franges par  $\gamma = \frac{\mathcal{E}_{max} - \mathcal{E}_{mini}}{\mathcal{E}_{max} + \mathcal{E}_{mini}}$  ;  $\mathcal{E}_{max}$  : éclairement du centre des franges brillantes et  $\mathcal{E}_{mini}$  : éclairement du centre des franges sombres.

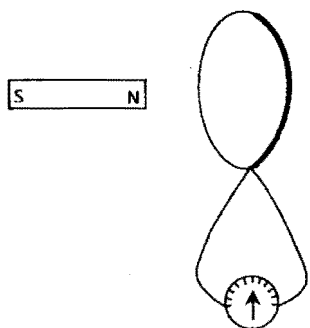
Montrer que  $\gamma = \frac{2E_{01}E_{02}}{E_{01}^2 + E_{02}^2}$  et en déduire que :  $\mathcal{E}(M) = (E_{01}^2 + E_{02}^2) \left[ 1 + \gamma \cos(2\pi \frac{\delta}{\lambda}) \right]$

avec  $\delta = |d_2 - d_1| = [S_2M] - [S_1M]$  : la différence de marche des chemins optiques.

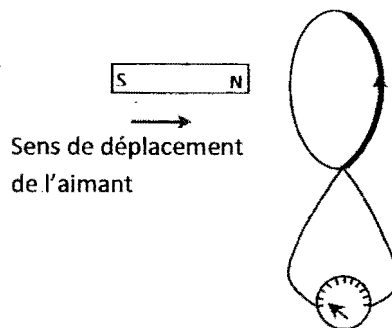
VI-3-3-4- Les franges d'interférences sont particulièrement visibles lorsque les deux vibrations composantes ont même amplitude ; alors on pose  $E_{01} = E_{02} = E_0$ .

Montrer que les franges brillantes observées sur l'écran se situent en des points tels que

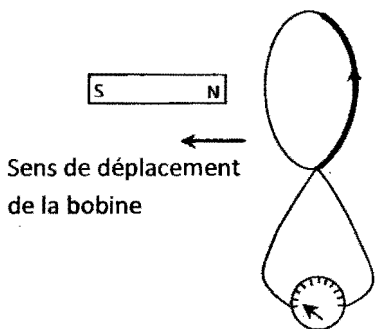
$\delta = n\lambda$  et que les franges obscures en des points où  $\delta = (2n+1) \frac{\lambda}{2}$  ;  $n$  : entier naturel.



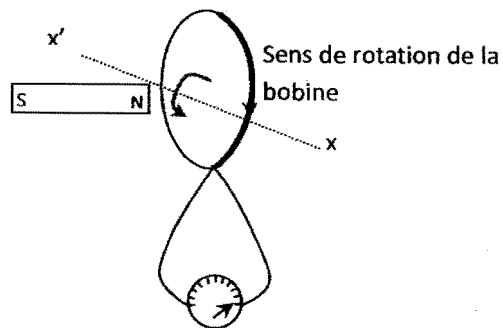
**Fig .1** L'aimant et la bobine sont immobiles, le galvanomètre reste au zéro.



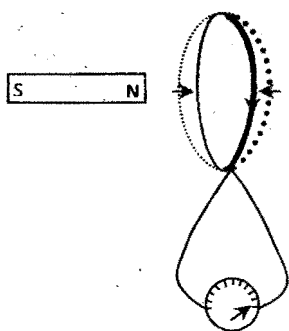
**Fig .2 a** Lorsque l'on déplace l'aimant par rapport à la bobine, le galvanomètre dévie.



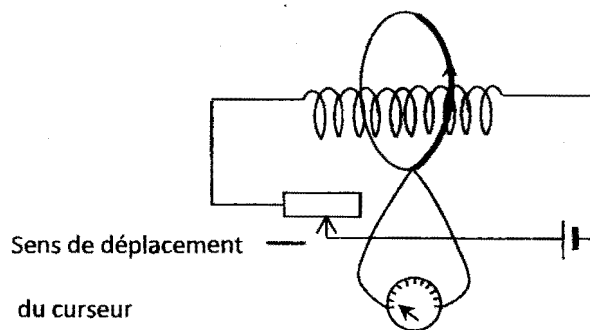
**Fig .2 b** Lorsque l'on déplace la bobine par rapport à l'aimant, le galvanomètre dévie.



**Fig 3** L'aimant étant fixe, le galvanomètre dévie lorsqu'on fait tourner la bobine.



**Fig .4** L'aimant étant fixe, le galvanomètre dévie lorsqu'on déforme la bobine.



**Fig .5** Le galvanomètre dévie lorsqu'on agit sur le curseur du rhéostat se trouvant dans le circuit du solénoïde.

**DOCUMENT**