

SESSION DE 2004

---

**concours externe  
de recrutement de professeurs certifiés  
et concours d'accès à des listes d'aptitude (CAFEP)**

---

section : physique et chimie

composition de physique avec applications

Durée : 5 heures

*Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique - à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

*L'usage de tout ouvrage de référence et de tout document est interdit.*

***Les candidats doivent reporter sur leur copie, devant leurs réponses, la numération complète (chiffres et lettres) des questions de l'énoncé.***

***Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale dans sa copie et poursuit sa composition en indiquant la raison des initiatives qu'il est amené à prendre de ce fait.***

L'enchaînement des parties A et B est logique mais leur résolution est totalement indépendante.

## Partie A. Astronomie pour amateurs

Nous allons examiner quelques aspects liés à l'astronomie d'amateur qui souvent passionne les élèves.

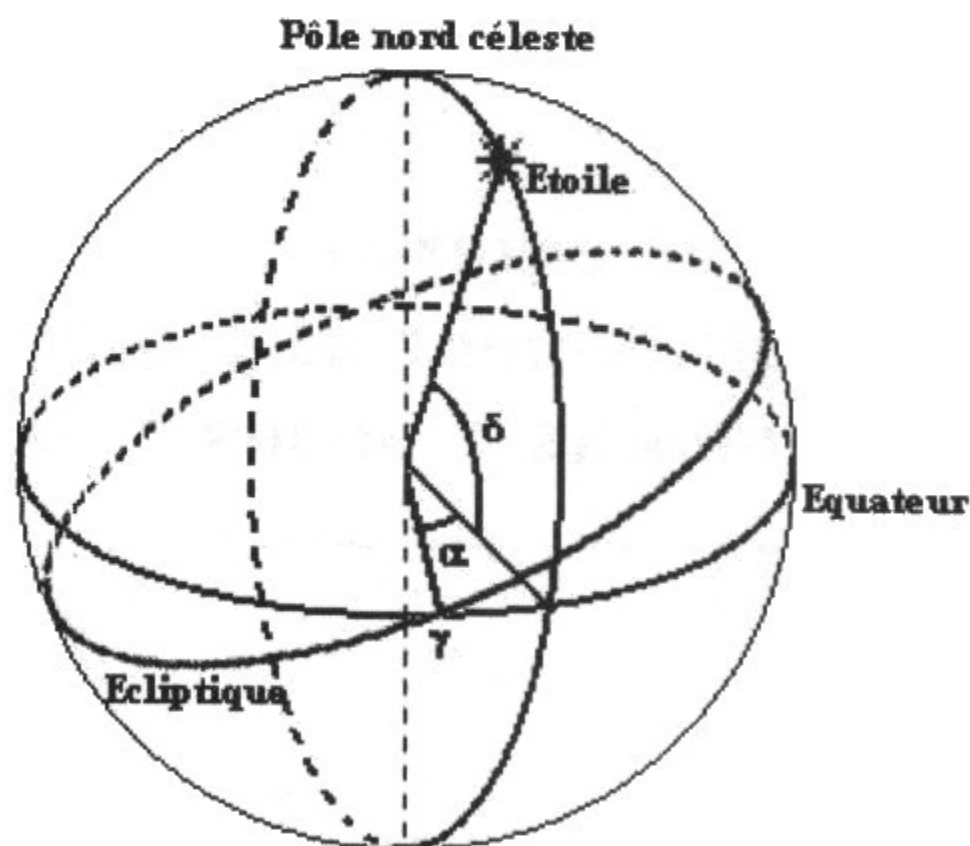
**Les différentes parties (I, II, III, IV, V et VI) sont largement indépendantes les unes des autres.**

On se place dans le référentiel géocentrique. La Terre tourne, sur elle-même, autour d'un axe passant par les pôles géographiques.

Le plan équatorial est perpendiculaire à cet axe. Le terme d'« étoile fixe » désigne une étoile fixe dans le référentiel géocentrique. On appelle « sphère des fixes » une sphère de rayon arbitraire sur laquelle sont repérées les positions des étoiles. Le mouvement apparent annuel du Soleil sur cette sphère est appelé « écliptique ».

Ce plan est incliné d'un angle de  $23^{\circ}27'$  par rapport au plan équatorial. L'intersection du plan de l'écliptique avec le plan équatorial est le point vernal  $\gamma$ . Une étoile fixe est repérée sur la sphère des fixes par ses coordonnées équatoriales. Les coordonnées équatoriales sont très utilisées en astronomie ; elles sont constituées de l'ascension droite ( $\alpha$ ), repérée à partir du point vernal  $\gamma$  et de la déclinaison ( $\delta$ ) représentées sur le schéma ci-contre.

On relève dans un ouvrage de vulgarisation d'astronomie quelques données et notamment les coordonnées équatoriales d'étoiles :



Étoile	Ascension droite	Déclinaison	Distance au soleil
(A) de la Petite ourse	$1^{\circ}49'$	$89^{\circ}02'$	466 a.l.
(B) de la Petite ourse	$14^{\circ}51'$	$74^{\circ}22'$	114 a.l.
(C) de Cassiopée	$0^{\circ}54'$	$60^{\circ}27'$	649 a.l.

Diamètre la Lune :  $D_L = 3,5 \cdot 10^3$  km ; distance Terre-Lune :  $d_{TL} = 3,8 \cdot 10^5$  km

Diamètre du cratère de Copernic  $D_c = 90$  km

### A.I. Préliminaires

A.I.1. Qu'est-ce qu'un référentiel ?

A.I.2. Définir successivement le référentiel héliocentrique (aussi appelé de Copernic) et le référentiel géocentrique.

A.I.3. Quel est le mouvement du référentiel géocentrique par rapport au référentiel héliocentrique ?

A.I.4. Quel est le mouvement de la Terre dans le référentiel géocentrique ?

A.I.5. Qu'est-ce qu'un référentiel galiléen ? Le référentiel géocentrique est-il galiléen ?

A.I.6. Faire une figure de la « sphère des fixes », placer les étoiles (A), (B), (C) sur cette figure. Les étoiles fixes dans le référentiel géocentrique le sont elles aussi dans le référentiel héliocentrique ? Justifier la réponse.

## A.II. Un peu de photographie

A.II.1. Un jeune astronome amateur place son appareil photographique sur un pied immobile. Son appareil est équipé d'un objectif de 50 mm. Il pointe le centre de son objectif en direction du pôle nord, après avoir fait la mise au point sur l'infini. Il déclenche et laisse le rideau métallique de l'obturateur ouvert pendant 1 h.

A.II.1.a. La pellicule de format 24 mm par 36 mm est développée. On observe des arcs de cercles dont le centre est proche de l'étoile polaire. Justifier ce résultat.

A.II.1.b. Quel est l'angle au centre de ces arcs de cercle obtenus ?

A.II.1.c. Définir le champ angulaire de l'instrument utilisé. Le calculer. Voit-on sur la pellicule l'arc de cercle formé par l'étoile (C) de la constellation de Cassiopée ?

A.II.1.d. Pour ce genre de photographie « circumpolaire », illustrant un mouvement, aurait-on intérêt à utiliser plutôt un grand angle (de courte distance focale) ou un téléobjectif (de grande distance focale) ? Justifier.

A.II.2.a. Son appareil toujours immobile, il pointe son objectif dans un second temps sur le centre de la pleine Lune, lorsqu'elle se trouve plein sud et haute dans le ciel. Il choisit comme temps de pose une durée de 2 s (en accord avec la cellule et la sensibilité du film). En assimilant son objectif à une lentille mince de 50 mm de focale quel est le diamètre de l'image de la Lune obtenue sur la pellicule ?

A.II.2.b. Peut-on imaginer un temps de pose beaucoup plus long, avec ce dispositif ?

A.II.3. À l'école primaire, au cycle des approfondissements, on aborde quelques notions élémentaires d'astrophysique (« le système solaire et l'univers »). On dit fréquemment : « plus l'on regarde loin, plus l'on observe le passé de l'univers ». Commenter cette affirmation. Combien de temps met la lumière émise par l'étoile polaire ((A) de la Petite Ourse) pour nous parvenir ?

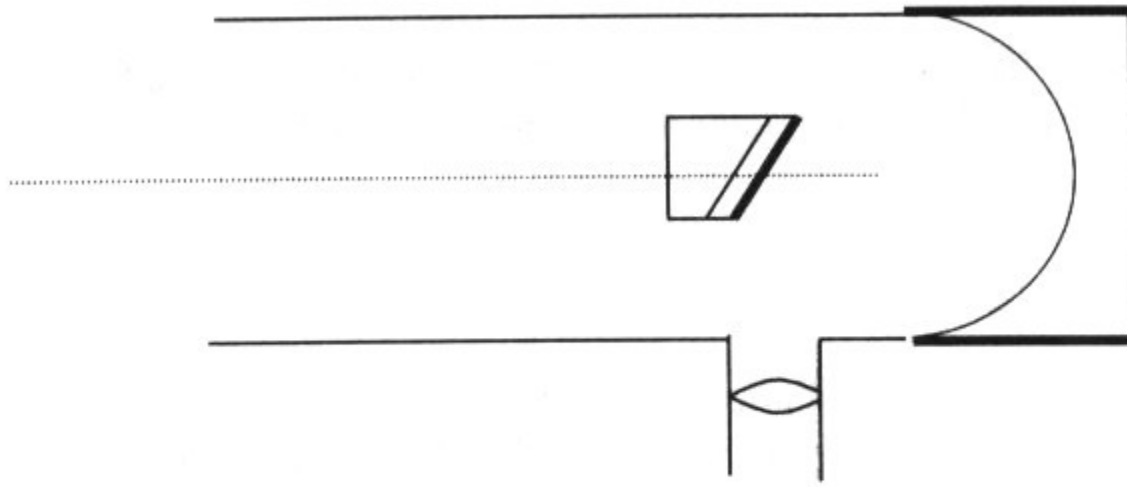
## A.III. Analyse d'un document publicitaire

De nombreux magazines vantent les mérites d'appareils d'observation. Notre jeune amateur relève une annonce publicitaire et l'apporte à son professeur qui anime un atelier scientifique:

*Un super télescope (114/910), de type Newton, pour débuter ! Simple à utiliser et captant 260% de lumière en plus qu'une lunette de 60 mm, ce télescope vous fera découvrir de très nombreux objets dans le ciel, une multitude de cratères lunaires, etc.... Son pouvoir séparateur est de 1''. Il est livré avec deux oculaires de 10 mm et 20 mm (91X et 45,5X) ; une lentille de Barlow 2X ; un chercheur 5X24 ; un trépied télescopique aluminium ; une monture équatoriale ; un moteur à quartz avec raquette de télécommande et une notice d'utilisation.*

A.III.1. Le tout premier télescope fut mis au point par Newton (1642-1727) en 1672 ; très souvent c'est le modèle par lequel débute de nombreux astronomes amateurs. Pour le télescope, les valeurs indiquées entre parenthèses correspondent au diamètre et à la distance focale du miroir principal de l'appareil en millimètres, quand à la lunette, la grandeur fournie est son diamètre.

On donne ci-dessous une représentation simplifiée de la partie optique du télescope : on a représenté le miroir sphérique, que l'on appellera miroir principal (c'est lui qui est frappé en premier par les rayons issus de l'astre observé), un miroir plan et l'oculaire, qui, dans la version simplifiée du télescope, est représenté par une lentille mince convergente.



A.III.1.a. Quels travaux d'Isaac Newton justifient-ils à votre avis le fait qu'on le considère comme un des plus grands physiciens de tous les temps ?

A.III.1.b. L'affirmation concernant les lumières « captées », par le télescope et la lunette, est-elle correcte? Justifier.

A.III.1.c. Citer un autre type de télescope.

A.III.1.d. Quel est l'intérêt de la monture équatoriale ? Du moteur ?

#### A.IV Etude des miroirs du télescope de Newton

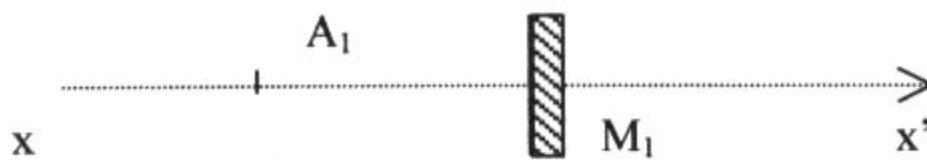
Le sens positif conventionnel de progression de la lumière est choisi de gauche à droite.

##### A.IV.1. Le miroir plan

A.IV.1.a. Quelles sont les deux principales interprétations du phénomène lumineux qui ont prévalu au cours des siècles depuis l'antiquité ? Pouvez-vous leur associer quelques noms de scientifiques ?

A.IV.1.b. Définir les notions d'objet ponctuel et d'image ponctuelle.

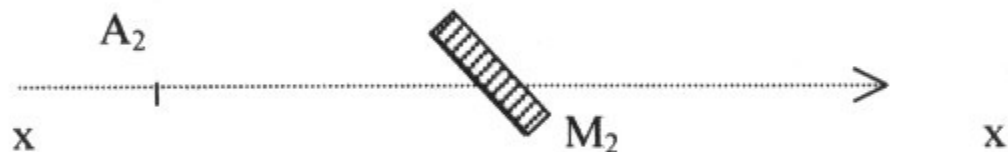
A.IV.1.c. Soit un objet ponctuel lumineux  $A_1$  situé sur un axe  $xx'$  perpendiculaire au plan du miroir  $M_1$ .



L'objet  $A_1$  est-il réel ou virtuel ?

Construire l'image  $A'_1$  de  $A_1$  donnée par  $M_1$ .

A.IV.1.d. Soit un objet  $A_2$  situé sur l'axe  $xx'$ , incliné d'un angle égal à  $45^\circ$  par rapport au plan du miroir plan  $M_2$ . L'objet est situé loin du miroir.



Construire l'image  $A'_2$  de  $A_2$  donnée par  $M_2$ . Où doit se placer un observateur pour voir  $A'_2$  ?

##### A.IV.2 Etude du miroir sphérique

A.IV.2.a. Définir les termes de stigmatisme rigoureux et d'aplanétisme.

A.IV.2.b. Pour quels points y a-t-il stigmatisme rigoureux pour un miroir plan ? Pour un miroir sphérique ?

A.IV.2.c. On considère un miroir sphérique concave de centre C, de sommet S (intersection du miroir avec son axe optique) et de rayon R. Soit un point objet à l'infini sur l'axe, montrer à l'aide d'un schéma en prenant des rayons incidents peu écartés de l'axe optique que l'on a affaire à un stigmatisme approché.

A.IV.2.d. Définir les conditions de Gauss.

A.IV.2.e. *La résolution de cette question n'est pas indispensable pour la suite, la formule de conjugaison du miroir sphérique pourra être admise.*

On se place dans les conditions de Gauss. Prendre un point objet A de l'axe optique du miroir ; l'image conjuguée de A par le miroir est notée A'. Montrer que les positions des deux points sont reliées par la

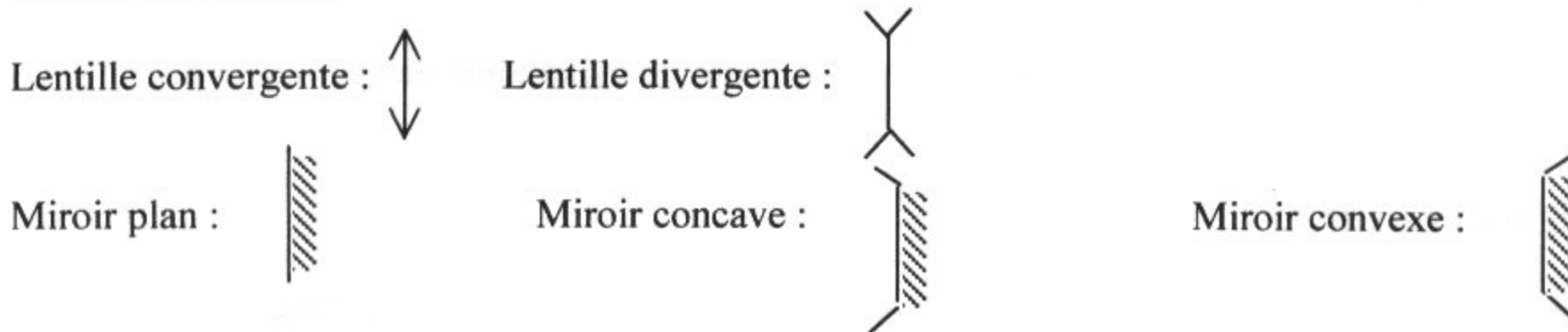
relation algébrique de Descartes suivante:  $\frac{1}{SA} + \frac{1}{SA'} = \frac{2}{SC}$ .

A.IV.2.f. En déduire la position des foyers objet et image du miroir.

A.IV.3. Image définitive donnée par le télescope de Newton simplifié.

*Le télescope envisagé est dit simplifié, car on assimile dans un premier temps l'oculaire à une seule lentille convergente.*

A.IV.3.a. On rappelle les notations symboliques des éléments de base des montages d'optique géométrique, lentilles et miroirs :



Représenter un télescope de Newton simplifié symbolique à l'aide de certains de ces éléments.

A.IV.3.b. L'observateur vise le centre du satellite naturel de la Terre, de sorte que l'axe principal du miroir primaire M soit dirigé vers le centre de la Lune. La Lune est alors vue depuis la Terre sous un angle  $2\alpha$ . Construire l'image A'B' de l'astre donnée par le miroir primaire. Quelle est sa dimension ?

A.IV.3.c. Isaac Newton a décidé de placer l'image A''B'' de A'B' par le miroir secondaire M' au foyer objet de l'oculaire. Pourquoi ?

A.IV.3.d. Newton a réalisé son télescope de sorte que le plan focal objet de l'oculaire soit à 60mm de l'axe optique du télescope. Pourquoi ?

Placer sur une figure A''B'', M' et A'B', en déduire la distance SS' entre les sommets respectifs des miroirs sphérique et plan.

A.IV.3.e. Un observateur dont la vision est « normale » place son œil au foyer image de l'oculaire et regarde A''B'' à travers l'oculaire. Représenter sur une figure l'oculaire, A''B'' et l'angle sous lequel est vue la Lune à travers le télescope de Newton simplifié.

A.IV.3.f. Définir et calculer le grossissement du télescope de Newton si l'on utilise l'oculaire de distance focale  $f = 10$  mm. Est-ce en accord avec l'annonce ?

## A.V. Étude de l'oculaire réel

On suppose que l'oculaire, de type Ramsden, est constitué de deux lentilles convergentes identiques de même axe principal et de distance focale  $f_1 = f_2 = f_i$ .

Les centres optiques de ces lentilles que l'on suppose minces sont séparés d'une distance  $e$  donnée par la relation  $\frac{f_i}{3} = \frac{e}{2}$ .

Dans le sens de parcours de la lumière on note  $F_1$  et  $F_1'$ , les foyers principaux, respectivement objet et image, pour la première lentille ainsi que  $F_2$  et  $F_2'$ , pour la seconde.

A.V.1. Montrer que le foyer objet  $F$  de l'oculaire est alors repéré par la relation  $\overline{F_1 F} = -\frac{f_1^2}{\Delta}$  où  $\Delta$ , intervalle optique, est donné par l'expression  $\Delta = \overline{F_1' F_2}$ .

A.V.2. Sur une feuille de papier millimétré, placer sur un même axe les points  $F_1$ ,  $F_1'$ ,  $F$ ,  $F_2$  et  $F_2'$ . On précisera l'échelle de la représentation.

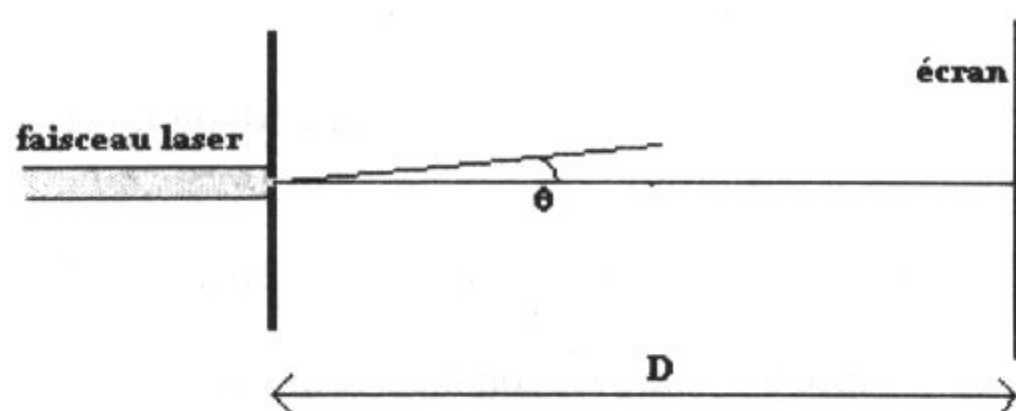
A.V.3. Sur la feuille de papier millimétré, placer au foyer objet de l'oculaire l'image  $A''B''$  symétrique par rapport à l'axe de l'oculaire. Tracer alors l'évolution d'un rayon issu de  $A''$  à travers le système optique (On pourra choisir le rayon particulier issu de  $A''$  qui passe par  $F_1$ ). Calculer le grossissement.

A.V.4. Souvent les oculaires sont corrigés des aberrations chromatiques. Expliquer en quelques lignes ce que cela signifie.

## A.VI. Pouvoir séparateur

A.VI.1. En quoi le phénomène de diffraction intervient-il sur le pouvoir séparateur de l'appareil? Citer un autre facteur influençant ce pouvoir séparateur.

A.VI.2. Afin d'illustrer ce phénomène on utilise un laser de laboratoire, qui émet une onde monochromatique de longueur d'onde  $\lambda = 628$  nm. Le faisceau laser passe à travers un trou circulaire, de diamètre  $d$ , situé dans un plan perpendiculaire à la direction incidente.



On place un écran à une distance  $D$  du plan de l'ouverture comme indiqué sur le schéma ci-contre.

Quel est le rayon  $\rho$  de la tache centrale d'Airy obtenue sur l'écran ?

On rappelle que le diamètre angulaire de la tache centrale de diffraction est donné par la relation :

$$\Delta\theta = 1,22 \frac{\lambda}{r}$$

On prendra  $d = 2r = 0,50$  mm et  $D = 5,0$  m.

A.VI.3. Tracer l'allure du graphe  $I(\theta)$  où  $I$  représente l'intensité lumineuse et  $\theta$  l'angle entre la direction incidente du faisceau laser et un rayon diffracté venant frapper sur l'écran.

A.VI.4.a. Dans le cas du télescope c'est le miroir qui limite le pouvoir séparateur.

Quel est le pouvoir séparateur du télescope de type Newton étudié ci-dessus ? Pour l'application numérique on choisira  $\lambda = 550$  nm.

A.VI.4.b. Quelle est la distance linéaire minimale séparant deux points sur la surface lunaire qu'un observateur pourra distinguer ? Peut-on distinguer des détails du cratère de Copernic ?

A.VI.4.c. On utilise des télescopes de diamètre 8,20 m à l'observatoire du mont Paranal au Chili dans le cadre du projet VLT (Very Large Telescope) mené par l'ESO (European Southern Observatory). Les télescopes seront dotés d'une optique adaptative permettant de compenser les effets de l'agitation atmosphérique ; il est également prévu d'associer, en mode interférométrique, les signaux reçus par les différents télescopes.

Quel est le pouvoir séparateur théorique d'un des télescopes ?

A.VI.4.d. Le plus grand télescope construit par la main de l'homme est un radiotélescope situé à Arecibo dans l'île de Porto Rico. Son réflecteur d'un diamètre voisin de 305 m est construit au fond d'un cratère naturel.

Quelle différence essentielle y a-t-il entre un radiotélescope et un télescope tel que le celui de Newton ? Citer un avantage et un inconvénient de ce radiotélescope.

## PARTIE B : LES ONDES RADIO

### Données

Constantes de la partie B dans les unités du système international :

$$\text{Constante de Planck : } h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

Dans l'ionosphère, la densité électronique est égale à  $n = 7 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$

$$\text{Charge de l'électron : } -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{Masse de l'électron : } m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{Célérité de la lumière dans le vide : } c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\text{Permittivité électrique du vide : } \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^9} \text{ F.m}^{-1}$$

$$\text{Perméabilité magnétique du vide : } \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$$

Une partie importante de l'activité des radioastronomes consiste à recevoir et analyser les ondes électromagnétiques provenant des corps célestes. Ceux-ci émettent des ondes dans toute la gamme des ondes radio, mais toutes ne peuvent pas être utilisées en radioastronomie avec des télescopes terrestres tels que celui d'Arecibo. Les ondes radio proviennent non pas des étoiles elles-mêmes, mais du gaz dilué qui existe entre les étoiles, ce qui permet d'avoir des informations sur la densité, l'état d'ionisation et le mouvement de ces gaz par rapport à la Terre.

### B.I. Préliminaires

B.I.1.a Définir les termes : onde, célérité .

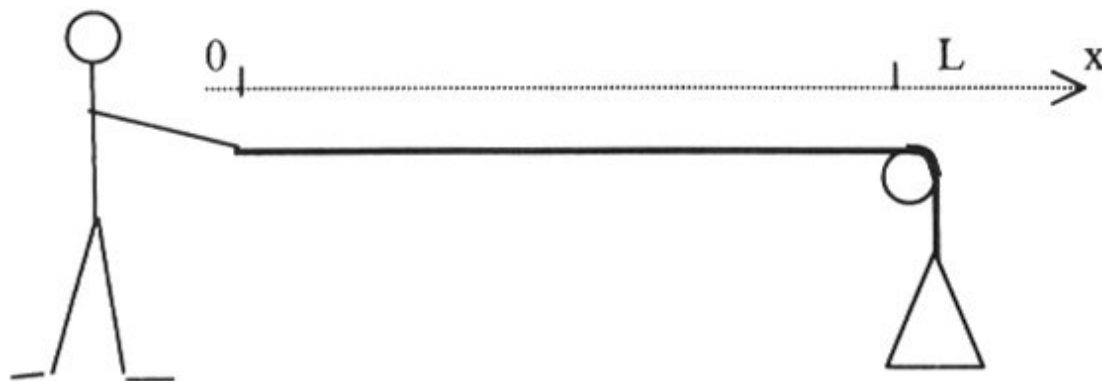
B.I.1.b. Qu'est-ce qu'une onde monochromatique ?

B.I.2. Dans le cas du son, puis de la lumière, citer au moins une expérience qui atteste le caractère ondulatoire du phénomène physique, et préciser la nature du milieu de propagation, l'ordre de grandeur de la célérité, le domaine de fréquence.

B.I.3. Dans le cas des ondes radio, citer le nom du physicien qui a prédit leur existence, ainsi que celui qui les a mis en œuvre au laboratoire pour la première fois.

### B.II. Propagation d'une onde non sinusoïdale

Soit une corde de masse linéique uniforme  $\mu$ , tendue sous une tension  $T$ .



Un expérimentateur tient dans sa main l'extrémité gauche de la corde en  $x=0$ . L'extrémité droite repose sur une poulie, on la considèrera comme fixe.

On note  $y(x,t)$  la position verticale de l'élément de corde situé à l'abscisse  $x$  à l'instant  $t$ . Lorsque la corde est au repos,  $y(x,t)=0$ .

B.II.1. Que représente  $y(0,t)$  ?



B.II.2. A condition d'adopter un modèle très simplifié pour la corde ci-dessus (corde sans raideur, poids de l'élément négligeable devant les tensions, pas de frottements, déplacement strictement transversal, petites inclinaisons des éléments de cordes), l'application de la relation fondamentale de la dynamique à un élément de corde conduit à l'équation suivante :

$$(I) \quad \mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$$

où  $T$  et  $\mu$  sont deux constantes, respectivement la tension à laquelle est soumise la corde et sa masse linéique.

B.II.2.a Qualifier l'équation (I)

B.II.2.b Déterminer la dimension de  $c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ . Interpréter  $c$

B.II.2.c Montrer que toute fonction  $y(x,t)$  qui s'écrit comme une fonction  $f(t-x/c)$  des variables indépendantes  $t$  et  $x$  est solution de l'équation (I). Interpréter.

B.II.2.d Montrer que toute fonction  $y(x,t)$  qui s'écrit comme une fonction  $g(t+x/c)$  des variables indépendantes  $t$  et  $x$  est solution de l'équation (I).

B.II.3. L'expérimentateur communique une secousse à la corde, de sorte que le déplacement vertical de sa main suive la loi horaire  $F(t)$  suivante :

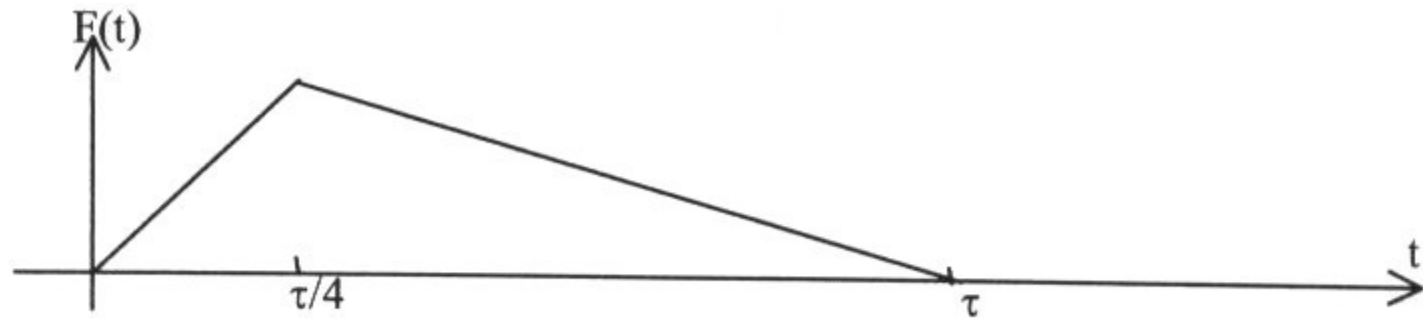
$$t < 0 \quad F(t) = 0$$

$$0 < t < \tau/4 \quad F(t) = Y_0 \times (t/(\tau/4))$$

$$\tau/4 < t < \tau \quad F(t) = Y_0 - Y_0 \times (t - \tau/4)/(3\tau/4)$$

$$t > \tau \quad F(t) = 0$$

$\tau$  est une constante homogène à un temps, elle est telle que la longueur  $L$  de la corde vérifie  $L = 5 c \tau$



B.II.3.a Déterminer en fonction de  $\tau$  la date  $t_1$  à laquelle la secousse arrive à l'extrémité droite de la corde .

B.II.3.b Que se passe-t-il pour  $t > t_1$  ?

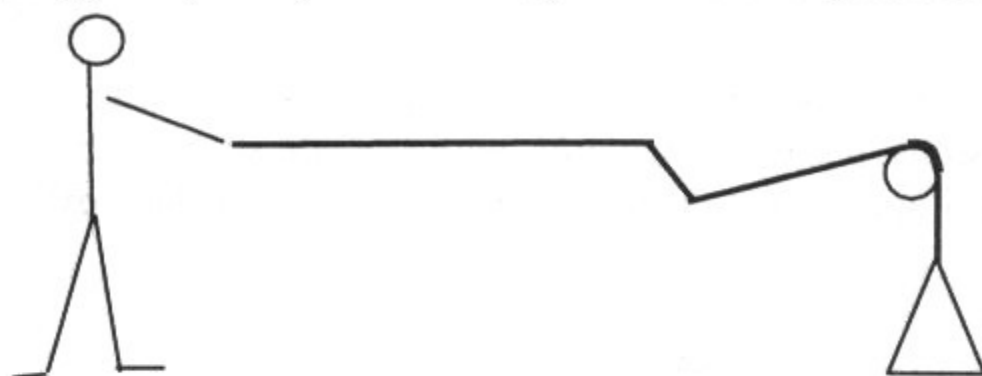
B.II.3.c On se place aux instants  $t < t_1$ . Justifier le fait que l'on cherche une solution de la forme  $y(x,t) = f(t-x/c)$  Exprimer les déplacements verticaux  $y(0,t)$ , puis  $y(x,t)$  à l'aide de la fonction  $F$ .

B.II.3.d. Représenter la corde aux instants  $t=0, \tau/4, \tau ; 2\tau$ .

B.II.4. On se place aux instants  $t > t_1$  et on cherche maintenant une solution de la forme  $y(x,t) = f(t-x/c) + g(t+x/c)$

B.II.4.a . Identifier dans  $y(x,t)$  l'onde incidente et l'onde réfléchie.

B.II.4.b. Montrer que  $g(t+x/c) = -F(t+x/c - 2L/c)$ , et en déduire qu'à l'instant  $t_2 = t_1 + \tau$  la corde a la forme suivante :



B.II.4.c. Dessiner la corde aux instants  $t = t_1 + \tau/4$ ,  $t = t_1 + \tau/2$ ,  $t = t_1 + 3\tau/4$ .

B.II.4.d. A quel instant l'ébranlement revient-il à l'expérimentateur ?

### B.III. Propagation d'ondes sinusoïdales ou quasi-sinusoïdales

On considère une corde très longue, de masse linéique  $\mu = 100 \text{ g.m}^{-1}$ , tendue sous une tension  $T = 50 \text{ N}$ , de sorte qu'on la considèrera infinie à droite. L'expérimentateur est désormais remplacé par un vibreur mécanique que l'on met en route à l'instant  $t=0$ , de sorte que :

$$Y(0,t) = 0 \text{ pour } t < 0$$

$$Y(0,t) = Y_0 \sin(\omega t) \text{ pour } t > 0.$$

$Y_0$  et  $\omega$  sont des constantes, respectivement l'amplitude et la pulsation du vibreur. La fréquence du vibreur est égale à 300 Hz.

B.III.1. On adopte ici le modèle de la corde idéale, dont la liste de conditions est rappelé plus haut.

B.III.1.a. Pour  $x < ct$ , exprimer  $y(x,t)$  sous la forme  $y(x,t) = A \sin(\omega t - kx)$ , et identifier A et k en fonction de  $Y_0$ ,  $\omega$  et c.

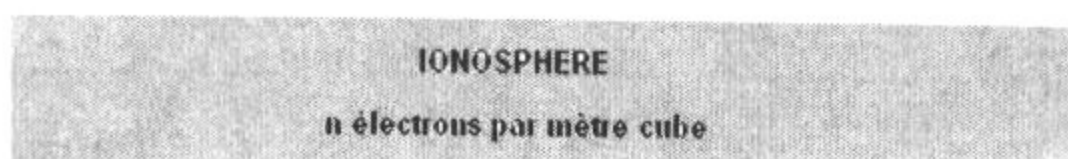
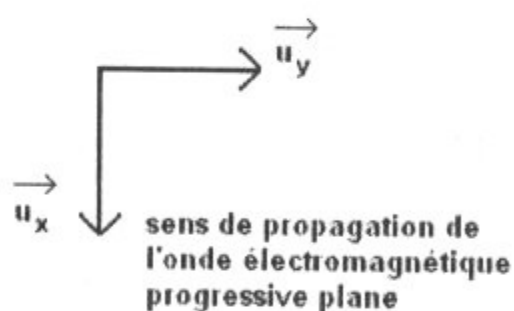
B.III.1.b. Déterminer le nombre d'oscillations effectuées par le vibreur à l'instant où l'ébranlement parvient à une distance  $d = 1 \text{ m}$  de l'excitateur.

B.III.1.c.  $T'$  désignant la période, dessiner l'allure de la corde à  $t = 3T'$ , puis à  $t = 3T' + T'/4$ .

B.III.1.d Définir et calculer la longueur d'onde  $\lambda$ . Représenter  $\lambda$  sur le graphe.

### B.IV Propagation des ondes radio

Dans le cas d'ondes électromagnétiques émises par les corps célestes, les champs électrique  $\vec{E}$  et magnétique  $\vec{B}$  se propagent dans le milieu interstellaire et interplanétaire que l'on assimile à du vide (dépourvu de charges et de courants) depuis la source, et parviennent parfois jusqu'aux télescopes terrestres. En effet, pour parvenir jusqu'aux télescopes terrestres, elles doivent franchir l'ionosphère : couche de particules ionisées, encore appelé plasma, située entre 100 et 500 km d'altitude.



Que ce soit dans le milieu interstellaire ou dans l'ionosphère, on admettra que les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  qui se propagent peuvent s'écrire  $\vec{E} = \Re(\underline{\vec{E}})$  avec  $\underline{\vec{E}} = \underline{E}_0 \cdot \exp(i(\omega t - kx)) \cdot \vec{u}_y$ , et  $\vec{B} = \Re(\underline{\vec{B}})$  avec  $\underline{\vec{B}} = \underline{B}_0 \cdot \exp(i(\omega t - kx)) \cdot \vec{u}_z$ .  $\underline{\vec{E}}$  et  $\underline{\vec{B}}$  sont les représentations complexes de champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ .

$\underline{E}_0$  et  $\underline{B}_0$  sont les amplitudes complexes des champs électrique et magnétique ;  $\omega$  est leur pulsation, c'est une grandeur toujours réelle et positive ;  $k$  est leur « module d'onde »,  $k$  peut éventuellement être une grandeur complexe.

Dans l'espace interstellaire  $\omega$  et  $k$  sont reliés par la relation de dispersion :

$$k = \omega/c.$$

Dans l'ionosphère  $\omega$  et  $k$  sont reliés par la relation de dispersion :

$$k^2 = (\omega^2 - \omega_p^2)/c^2$$

$\omega_p$  est une constante caractéristique du milieu, appelée « pulsation plasma » dont l'expression est la suivante  $\omega_p^2 = (ne^2)/(m\epsilon_0)$ .

B.IV.1. On envisage le cas  $\omega > \omega_p$ , et on s'intéresse aux ondes radio à l'intérieur de l'ionosphère.

B.IV.1.a. Calculer  $k$  en fonction de  $\omega$ ,  $\omega_p$  et  $c$ .

B.IV.1.b. On envisage la superposition de deux champs électriques  $\vec{E}_1$  et  $\vec{E}_2$  d'amplitude  $E_0/2$ , et de pulsations respectives  $\omega$  et  $\omega + \Delta\omega$  (avec  $\Delta\omega \ll \omega$ ) dont les modules d'onde sont respectivement  $k$  et  $k + \Delta k$  (avec  $\Delta k \ll k$ ), dirigés selon  $\vec{u}_y$ . Donner les expressions réelles des champs  $\vec{E}_1$  et  $\vec{E}_2$ .

B.IV.1.c Calculer le champ total résultant de la superposition de ces deux champs.

B.IV.1.d. En utilisant la formule de trigonométrie convenable, faire apparaître un produit de fonctions sinusoïdales dans l'expression du champ total, et en déduire l'interprétation que l'on peut faire des rapports suivants :

$$v_\phi = \omega/k \text{ et } v_g = \Delta\omega/\Delta k.$$

B.IV.1.e Exprimer  $v_\phi$  et  $v_g$  dans le plasma en fonction de  $\omega$ . Calculer le produit de ces deux termes.

B.IV.1.f Pourquoi dit-on du plasma que c'est un milieu dispersif ? Qu'en est-il de l'espace interstellaire ?

B.IV.2. On envisage le cas  $\omega < \omega_p$ , et on s'intéresse aux ondes radio à l'intérieur de l'ionosphère.

B.IV.2.a. Calculer  $k$  en fonction de  $\omega$ ,  $\omega_p$  et  $c$ .

B.IV.2.b Donner successivement les expressions des champs électriques complexe puis réel. En déduire que les ondes radio de pulsation  $\omega < \omega_p$  ne peuvent pas traverser l'ionosphère.

B.IV.2.c Déterminer numériquement la profondeur de pénétration de l'ionosphère par des ondes radio de fréquence 3MHz. Qu'advient-il de l'énergie contenue dans ces ondes ?

B.III.3.a. Une partie importante de l'activité des radioastronomes porte sur l'étude de l'hydrogène neutre qui n'a pas de raie d'émission dans le domaine visible, mais qui émet une raie correspondant à la différence d'énergie ( $\Delta E = 9,4 \cdot 10^{-25} \text{ J}$ ) entre les spins du niveau fondamental de l'atome.

Quelles sont la fréquence et la longueur d'onde correspondant au rayonnement émis ? Ce rayonnement peut-il se propager dans l'ionosphère ? Justifier.

À quelle vitesse se propage l'énergie électromagnétique provenant de l'hydrogène des nuages de gaz dans l'ionosphère ? Commenter.

B.III.3.b. La fréquence du rayonnement reçu  $f_r$  ne correspond pas exactement à la fréquence d'émission  $f_e$  de l'hydrogène. La différence  $\Delta f = f_r - f_e$  permet d'avoir des informations sur le mouvement des gaz par rapport à l'observateur. Quel est le phénomène physique qui entre en jeu ? Décrire brièvement ce phénomène.