

Session de mai 2000

Epreuve de Sciences Physiques

Durée 3 heures

Classes Préparatoires MP, PC, PSI, PT

Attention	- aucun document n'est autorisé - les calculatrices sont formellement interdites
-----------	---

Les candidat(e)s veilleront à exposer leurs démonstrations avec clarté et rigueur; rédiger avec soin dans un français correct, et reporter dans la marge les numéros des questions traitées.

Les raisonnements étant essentiels, les relations utilisées devront être justifiées par l'application des lois, théorèmes et principes nécessaires. Les affirmations non justifiées ou non démontrées ne seront pas considérées comme valables.

L'usage de la calculatrice étant interdit, une attention particulière sera accordée aux connaissances de cours. Les applications numériques demandées seront effectuées avec deux chiffres significatifs; les résultats numériques sans unité physique correcte ne seront pas pris en compte.

Les passages rédigés au crayon de papier ne seront pas notés.

Le problème proposé étudie le fonctionnement d'un **lecteur optique de disques compacts mono-faisceau**.

La constitution du *bloc optique* BO fait l'objet de la première partie. Les mécanismes de *focalisation* et de *suivi de piste* sont étudiés dans la deuxième partie. La troisième partie s'intéresse à l'*asservissement de focalisation* et de *suivi de piste*.

Le schéma général de fonctionnement du lecteur est le suivant (fig.1):

- le **disque compact** CD en plastique transparent d'indice optique $n = 1,5$ est recouvert d'un film réfléchissant en aluminium FA sur lequel est gravée la piste spirale représentant le message audio sous forme d'aspérités microscopiques oblongues ("pit") du côté plastique
- le faisceau d'une **diode-laser** DL est focalisé par deux lentilles optiques sur la piste qui défile à vitesse linéaire V constante. Le faisceau réfléchi modulé par les *pits* illumine un **détecteur à photodiodes** DP, et le signal électrique ainsi produit est converti numériquement, décodé puis converti en signal analogique audio
- La distance entre la lentille L_1 et DL est fixée par construction. Le positionnement de la **lentille de focalisation** du faisceau L_2 sur la piste est contrôlé par une boucle d'asservissement.
- Le suivi de la piste est assuré par un **moteur radial** M contrôlé par une boucle d'asservissement radial.

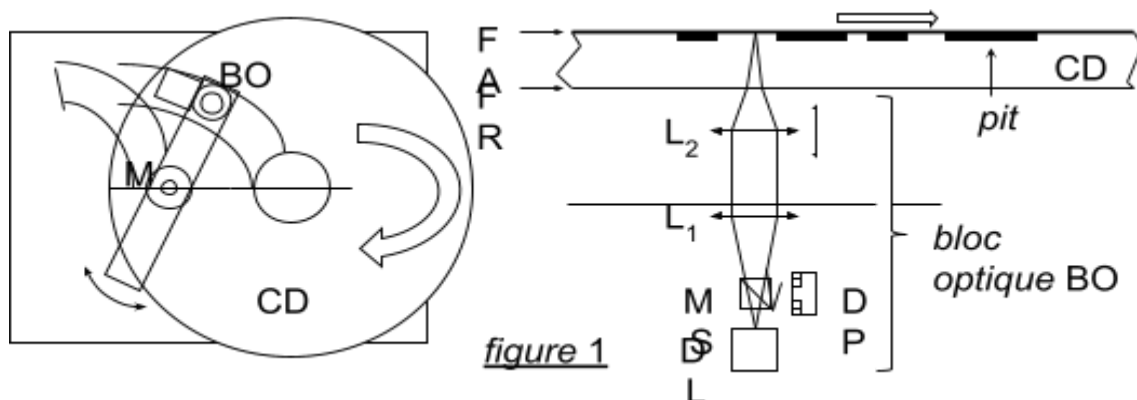


figure 1

I. ETUDE DU BLOC OPTIQUE

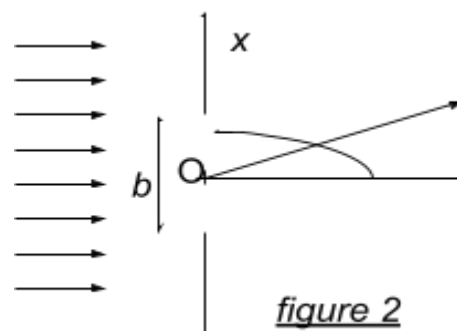
I.1. QUESTIONS PRELIMINAIRES

Le faisceau lumineux est issu de la diode-laser DL émettant un rayonnement quasi monochromatique de longueur d'onde $\lambda_0 = 785 \text{ nm}$ dans le vide dans un cône d'environ 30° .

I.1.1. Dans quel domaine des ondes électromagnétiques se situe le rayonnement de la diode-laser utilisée?

I.1.2. Expliquer succinctement ce qu'est le phénomène de diffraction et dans quelles circonstances il se manifeste.

I.1.3. Un faisceau lumineux parallèle monochromatique de longueur d'onde λ_0 éclaire en incidence normale un diaphragme formé dans un écran opaque plan par une fente infiniment longue de largeur b . Soit O un point origine au milieu de la fente et Ox l'axe perpendiculaire à la fente dans le plan de l'écran. Déterminer l'intensité lumineuse observée à l'infini à l'arrière de la fente dans la direction de vecteur unitaire $\vec{u}$ perpendiculaire à la fente et faisant un angle θ avec la normale à la fente (fig.2).



I.1.4. En déduire l'angle $2\theta_0$ du dièdre dans lequel on trouve la quasi totalité de l'intensité lumineuse (lobe principal).

I.2. FOCALISATION

La lentille convergente L_1 de centre optique O_1 et de distance focale $f'_1 = 20 \text{ mm}$ a pour rôle de transformer le faisceau divergent émis par la DL en un faisceau parallèle à son axe optique Oz vertical. La **lentille de focalisation** convergente L_2 de centre optique O_2 et de distance focale f'_2 concentre ensuite ce faisceau sur la face aluminée FA du CD. L_1 et L_2 ont un diamètre identique et leur axe optique est le même (fig.3).

I.2.1. La surface de la jonction émettrice J de la DL est placée exactement au foyer objet F_1 de L_1 . Où se trouvent ses images successives A'_1 formée par L_1 puis A'_2 formée par L_2 en l'absence du disque?

I.2.2. Un diaphragme placé à 5 mm de J limite transversalement le faisceau émis pour qu'il recouvre L_1 sur un diamètre $D = 4 \text{ mm}$. Que vaut le diamètre D_0 du diaphragme? Exprimer l'angle au sommet α_2 du cône lumineux émergent de L_2 en fonction de D et f'_2 .

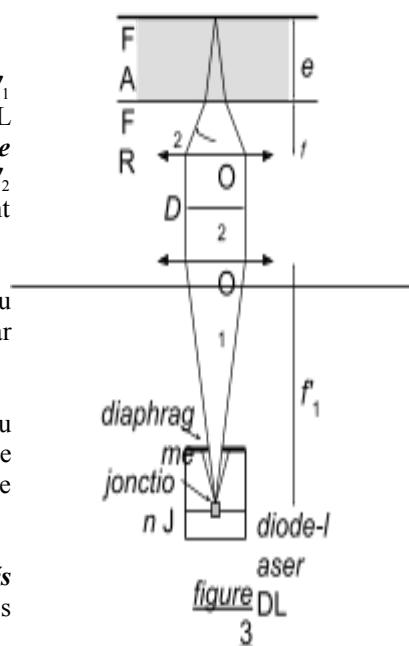
I.2.3. Par la suite, **on considérera que tous les dioptries et lentilles rencontrés sont utilisés dans les conditions de Gauss**. En quoi consistent ces conditions? Quel est leur intérêt? Simplifier alors l'expression de α_2 .

I.2.4. Soit $e = 1,2 \text{ mm}$ l'épaisseur de la couche plastique du CD entre la face de référence FR inférieure et le film aluminium supérieur FA. La distance Δ_f entre O_2 et FR doit être inférieure à f'_2 pour que le faisceau converge sur le film d'aluminium FA. Exprimer alors Δ_f en fonction de n , e et f'_2 .

I.2.5. En réalité, le spot lumineux sur FA ne peut pas être ponctuel même si la focalisation est parfaite, et son

diamètre minimum est $d \approx 2,44 \frac{\lambda}{D} f'_2$. Préciser pourquoi et expliquer cette expression en détail. En déduire la valeur de f'_2 pour obtenir un spot de diamètre $d = 1 \mu\text{m}$.

I.2.6. Justifier le choix d'une diode-laser plutôt que celui d'une diode électroluminescente.



I.2.7. Exprimer le déplacement ε' de A'_2 consécutif à un décalage ε de J par rapport à F_1 le long de l'axe optique en fonction de f'_1, f'_2 et de la distance E entre les lentilles. Calculer ε' pour $\varepsilon = 0,2$ mm et $E = 10$ mm.

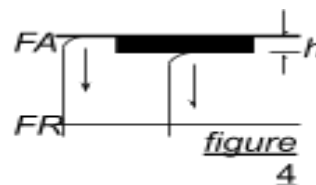
I.3. LECTURE DU SIGNAL AUDIO CODÉ

Le faisceau réfléchi sur la face FA retransverse L_2 puis L_1 avant d'être dévié à 45° vers le détecteur à photodiodes DP par un *cube séparateur* constitué d'un **miroir semi-réfléchissant** MS en verre (fig.1).

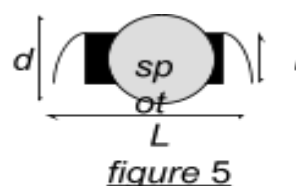
Le détecteur DP assure trois fonctions essentielles: · mesure de la qualité de la focalisation; · mesure du suivi de piste ; · lecture optique du signal audio.

La réflexion plastique-aluminium s'effectue sans déphasage.

I.3.1. Lorsqu'un *pit* défile sous le spot, la partie du faisceau réfléchi par la surface du *pit* subit une *avance de phase* ϕ par rapport au reste du faisceau réfléchi par la face FA. Exprimer ϕ en fonction de λ_0, n et de la hauteur h du *pit* (fig.4).



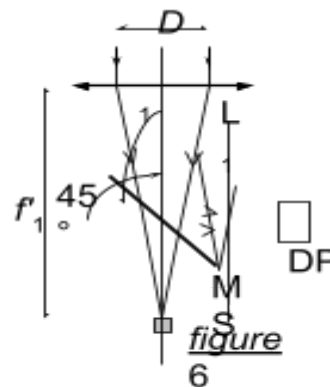
I.3.2. Quelle doit être la valeur minimale de h pour que l'intensité lumineuse totale I du faisceau réfléchi soit *nulle* lorsque le spot laser est exactement centré sur un *pit* long de longueur $L > d$ (la largeur $l < d$ est telle que la surface du spot est *également répartie* sur le *pit* et à côté du *pit*; voir fig.5)?



II. ÉTUDE DE L'ACTUATEUR DE FOCALISATION

II.1. MESURE DE LA FOCALISATION

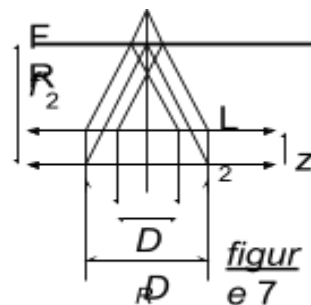
II.1.1. Exprimer l'angle au sommet α_1 du cône formé par le faisceau convergent sur le détecteur DP en fonction de D et f'_1 lorsque la focalisation est parfaite. On appellera α_0 sa valeur correspondante (fig. 6).



II.1.2. On suppose que la lentille de focalisation L_2 est décalée verticalement d'une distance z par rapport à sa position normale de focalisation parfaite (fig. 7). Déterminer le diamètre D_R du faisceau réfléchi entre L_2 et L_1 en fonction de z, D et f'_2 , puis l'expression de α_1 en fonction de z, α_0 et f'_2 (on pourra montrer que ce résultat est indépendant de e). Comment évolue α_1 autour de α_0 suivant le signe du décalage z ?

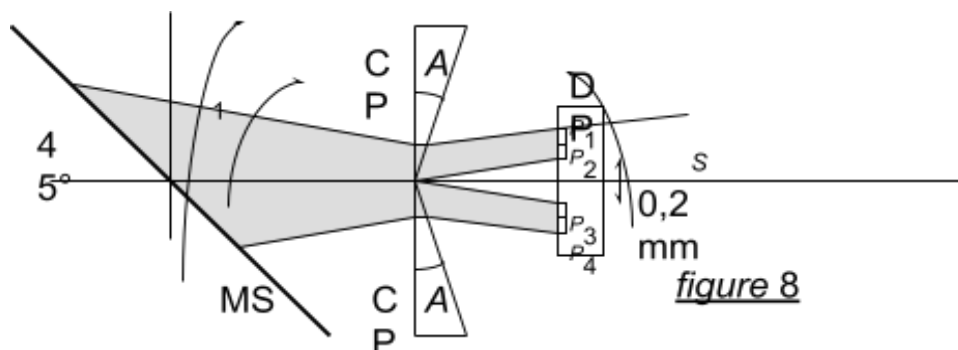
II.1.3. Le détecteur DP est constitué de quatre photodiodes P_1, P_2, P_3 et P_4 identiques juxtaposées symétriquement par rapport à l'axe du faisceau réfléchi par le miroir MS. Un **double coin prismatique** en verre CP dévie légèrement le faisceau pour qu'il soit réparti sur les quatre diodes lorsque la focalisation est parfaite (fig. 8 page suivante). Soit A l'angle au sommet des prismes d'indice optique $n = 1,5$.

Déterminer l'angle α_s d'un rayon lumineux en sortie de prisme en fonction de A, n et de son angle d'incidence α_i (tous les angles sont petits).



II.1.4. Le coin optique est à 1 mm de DP et les photodiodes centrales sont distantes de 0,2 mm. Calculer A (en radian) pour que les rayons d'incidence nulle centrés sur l'axe de symétrie puissent affleurer les bords des photodiodes centrales P_2 et P_3 si la focalisation est parfaite (fig. 8).

II.1.5. On place l'ensemble {coin optique CP, détecteur DP} dans le faisceau réfléchi par MS de sorte que les quatre photodiodes reçoivent le même éclairement lorsque la focalisation est parfaite. Quelles sont les photodiodes les plus éclairées suivant que la lentille L_2 est déplacée verticalement de $z > 0$ ou $z < 0$?



II.1.6. Les quatre diodes sont connectées à un convertisseur CI_1 réalisant la production de trois signaux:

- la *tension d'erreur de focalisation*: $u_{FE} = G z$ (G est une constante positive)
- la *tension de lecture* u_{HF} du signal audio numérique, proportionnelle à l'intensité lumineuse modulée I
- la *tension d'erreur de suivi de piste* u_{TE} , algébriquement proportionnelle au décalage du spot par rapport au centre de la piste.

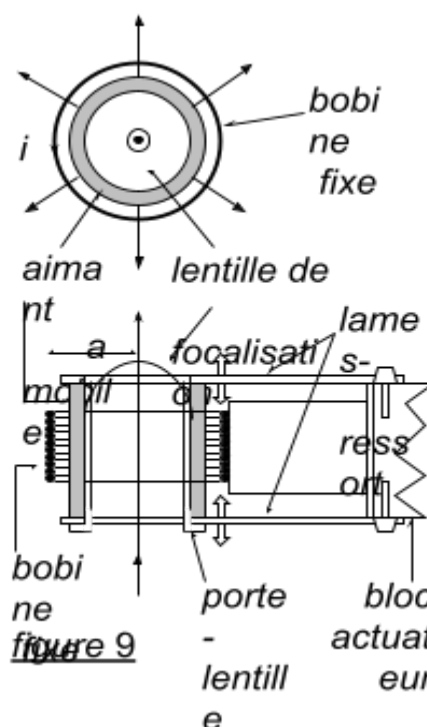
Soient i_1, i_2, i_3 et i_4 les courants des photodiodes, proportionnels à leurs éclaircissements. Quelles combinaisons linéaires de ces courants le convertisseur CI_1 doit-il réaliser pour obtenir respectivement u_{FE} , u_{HF} et u_{TE} ?

II.2. MODELE ELECTROMECHANIQUE DE L'ACTUATEUR

La position de la lentille L_2 doit être constamment ajustée en fonction de celle de la face aluminée FA du CD pour maintenir le diamètre du spot le plus près possible de sa valeur minimale $d = 1 \mu m$, quelles que soient les irrégularités de surface du CD.

Le déplacement de la lentille L_2 est réalisé au moyen d'un **actuateur** constitué d'une **bobine magnétique fixe** BF et d'un équipement mobile formé d'un **aimant mobile creux** AM fixé sur le **porte-lentille**, lui-même lié au bloc actuateur par deux **lames-ressorts** (fig. 9). Celles-ci exercent une force de rappel élastique sur l'équipage mobile, de **constante de raideur** équivalente k .

Le **champ magnétique** produit par l'aimant est radial à l'extérieur de celui-ci et de module constant B à la distance correspondant au rayon moyen a de la bobine BF, de résistance électrique R et de coefficient d'auto-induction L . Pour les calculs, on supposera la bobine constituée d'une seule couche de N spires jointives circulaires de rayon a , coaxiale à l'aimant.



II.2.1. Quelle est la nature de la force $\vec{F}_{AB}$ exercée par le champ magnétique de l'aimant sur la bobine? Comment est-elle orientée si le courant i circule dans le sens direct autour de l'axe vertical ascendant Oz orienté par le vecteur unitaire $\vec{e}_z$?

II.2.2. Calculer précisément l'expression de cette force en coordonnées cylindriques en fonction de i , N , B et a .

II.2.3. En déduire l'expression de la force $\vec{F}_{BA}$ exercée par la bobine sur l'équipage mobile porte-lentille.

II.2.4. Soit $z = 0$ la position de repos de l'équipage mobile de masse m , en focalisation parfaite. Lors d'une perturbation (choc, poussière, etc...), l'équipage mobile effectue un déplacement z fonction du temps t . Etablir l'**équation différentielle mécanique** (E1) de son mouvement suivant l'axe Oz (on négligera les forces de frottement).

II.2.5. Préciser qualitativement de quels phénomènes d'induction la bobine est le siège.

II.2.6. La bobine est alimentée par la tension de sortie $u_s(t)$ d'un filtre correcteur CI_2 (voir § III). Représenter le *schéma électrique équivalent de la bobine* en faisant apparaître l'intensité algébrique i générée par u_s . En déduire l'*équation électrique* (E2) de la bobine reliant u et i .

II.2.7. On étudie la réponse harmonique de l'actuateur en supposant que toutes les grandeurs u_s , i , z sont des fonctions sinusoïdales de t , de même pulsation imposée ω . On les écrira sous forme complexe $\underline{A} e^{j\omega t}$. Montrer que la fonction de transfert harmonique de l'actuateur est de la forme

$$H(\omega) = \frac{\underline{Z}}{\underline{U}_s} = \frac{H_0}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_1}\right) \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) + j \frac{\omega}{\omega_2}}$$

Déterminer les expressions de H_0 , ω_0 , ω_1 et ω_2 en fonction de N , a , B , k , m , R et L .

II.2.8. Applications numériques:

Données: $m = 5 \text{ g}$; $k = 10 \text{ N.m}^{-1}$; $N = 300$; $a = 5 \text{ mm}$; $R = 10 \text{ } \Omega$; $L = 1 \text{ mH}$; $B = 0,2 \text{ T}$

Calculer ω_0 , ω_1 et ω_2 .

La vitesse linéaire de la piste devant l'actuateur est $v = 1,4 \text{ m.s}^{-1}$ et le diamètre du CD varie entre 5 cm au centre et 11,6 cm à l'extérieur. En déduire la pulsation minimale $\omega_{\min}$ de positionnement de l'actuateur lors de la lecture de la piste. On supposera que la pulsation maximale est $\omega_{\max} = 1000 \omega_{\min}$.

Montrer que dans la plage $\omega_{\min} \ll \omega \ll \omega_{\max}$, la fonction de transfert $\underline{H}(\omega)$ de l'actuateur se réduit à $\alpha \omega^{-2}$ (α est une constante réelle). Tracer le graphe asymptotique H (en dB) en fonction de $\lg \omega$.

III. ÉTUDE DE L'ASSERVISSEMENT DE FOCALISATION

On intercale entre la broche u_{FE} de CI_1 et la bobine de l'actuateur un circuit correcteur de puissance CI_2 (fig. 10). L'amplificateur opérationnel est supposé idéal.

III.1. Déterminer la fonction de transfert harmonique $\underline{H}(\omega)$ du circuit CI_2 sous la forme

$$\underline{H}'(\omega) = \frac{\underline{U}_s}{\underline{U}_{FE}} = H'_0 \frac{1 + j \frac{\omega}{\omega_3}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_4}}$$

où on exprimera H'_0 , ω_3 et ω_4 en fonction de R_1 , R_2 , C_1 et C_2 .

III.2. On choisit d'imposer $\omega_3 = \omega_0$ et $\omega_4 = 100\omega_0$. Tracer le graphe asymptotique H' (en dB) en fonction de $\lg \omega$ (on prendra $R_1 = R_2$).

III.3. En déduire que la réponse harmonique de l'ensemble {correcteur, actuateur} est essentiellement celle d'un *intégrateur pur* dans la plage considérée.

III.4. On suppose que la face FA du CD comporte une irrégularité en forme d'échelon $z = 0 \rightarrow \Delta z$. Tracer l'allure de la réponse de l'ensemble {actuateur, correcteur}. Conclure.

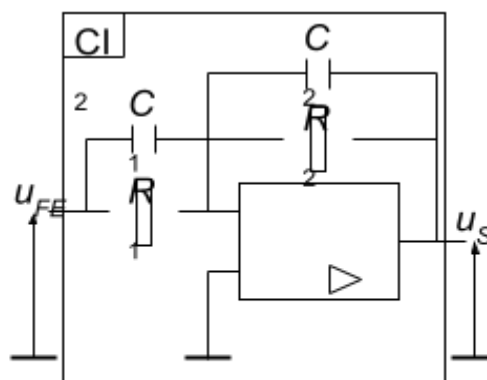


figure 10