

DEVOIR SURVEILLÉ N°2

Classe MPI - Promotion 2025



Composition de Physique

Durée : 4 heures

Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

- *Utiliser uniquement un stylo noir ou bleu foncé pour la rédaction de votre composition ; d'autres couleurs peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les schémas et la mise en évidence des résultats.*
- *Écrire le mot FIN à la fin de votre composition.*

Les calculatrices sont autorisées.

Les différentes parties sont indépendantes.

► Données :

~> **constantes :** $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ $N_a = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ $\mathcal{F} = 96\,500 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$
 $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$ $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$

~> **La planète Terre :** $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

► Formulaire :

~> **Conversion :** $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ $T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273$

A - Identification d'un circuit intégré

On récupère au laboratoire un circuit intégré comportant un certain nombre de portes logiques identiques, dont on est sûr :

- de leur tension d'alimentation $V_{cc} = 15\text{ V}$ associée à la technologie CMOS employée ;
- de la faible valeur ($i < 0,1\mu\text{A}$) des courants d'entrée, qu'on négligera donc dans tout ce qui suit

Les références du circuit intégré n'étant plus lisibles, on n'est plus sûr de la nature des portes en question ; on sait cependant qu'il s'agit nécessairement de portes figurant dans la liste AND, OR, NAND, NOR (ou en français ET, OU, NON ET, NON OU). Pour déterminer la nature de ces portes, on réalise deux séries de mesures de la caractéristique entrée-sortie selon les schémas des figures 1 et 2.

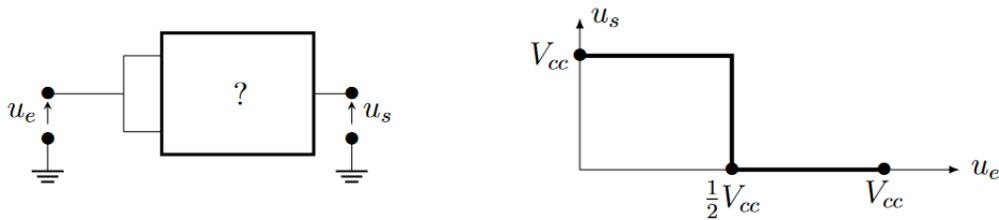


FIGURE 1 – Montage d'une première série de mesures (à gauche) et ses résultats (à droite)

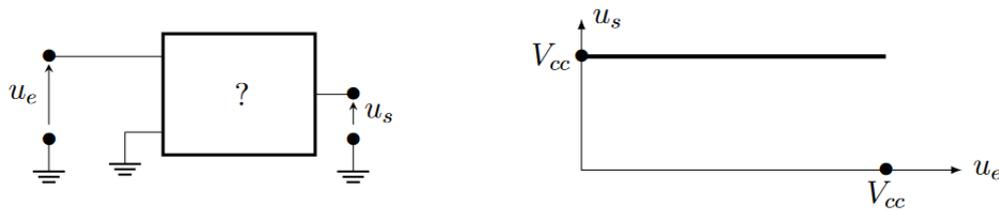


FIGURE 2 – Montage de la seconde série de mesures (à gauche) et ses résultats (à droite)

1. Que peut-on déduire de la première expérience (figure 1) ? Et de la seconde expérience (figure 2) ?

On poursuivra l'étude, indépendamment des conclusions ci-dessus, en n'utilisant que des portes NAND (NON ET) que l'on symbolisera à l'aide du schéma représenté en figure 3.

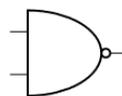


FIGURE 3 – Schéma d'une porte NAND

2. Proposer des montages n'utilisant que des portes NAND réalisant les fonctions NOT, AND et OR. On vérifiera le comportement de chaque montage en donnant sa table de vérité.

3. Le circuit intégré Texas Instruments CD-4011 (photographie de la figure 4) comporte quatorze broches (pins en anglais). Combien de portes NAND comporte-t-il au maximum ? Justifier.



FIGURE 4 – Circuit intégré TI CD-4011

B - Emploi de portes logique

De nombreux documents destinés à la réalisation de montages d'électronique musicale proposent l'utilisation du circuit théorique présenté sur la figure 6 avec $R = 1\text{M}\Omega$ et $C = 100\text{ nF}$. La tension d'entrée marquée v (pour "valid") peut être, selon le cas :

- maintenue égale à $v = 0\text{ V}$ (le circuit est alors dit *invalidé*) ;
- portée à la valeur constante $v = +V_{cc}$ (le circuit est alors dit *validé*). On considérera qu'à l'instant de la validation le condensateur est déchargé.

On notera $s(t)$ la tension en sortie de la porte 2 et $e(t)$ la tension à l'autre entrée de la porte 1 (voir figure 5). Les tensions e , s et v sont toutes déterminées relativement à la masse électrique du montage. Dans toute la suite de cette partie, on suppose que le seuil de basculement des portes NAND utilisées est égal à $V_{cc}/2$. On notera respectivement b_s et b_e les valeurs binaires associées à s et e ; ainsi par exemple $b_s = 1$ si $s > V_{cc}/2$ et $b_s = 0$ sinon.

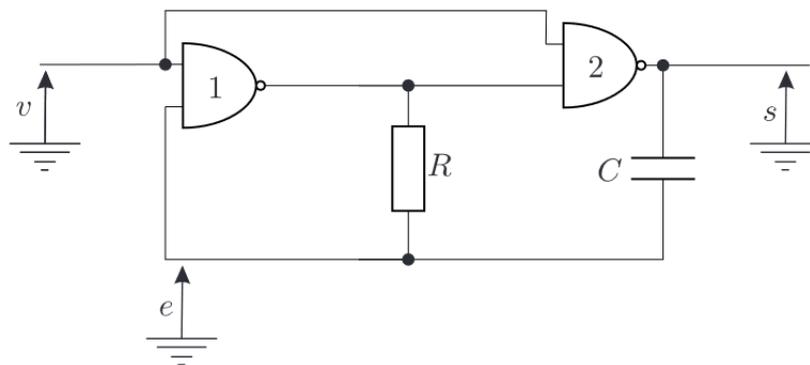


FIGURE 5 – Un circuit classique de l'électronique musicale

4. Lorsqu'il est invalidé, montrer que le circuit atteint toujours un état stable pour lequel on déterminera les valeurs de s et e , et de b_s et b_e .
5. À l'instant $t = 0$ le circuit est alors validé. Montrer qu'une seule des deux portes NAND change d'état (on dit qu'elle bascule) ; laquelle ? Que dire de la différence $e(t) - s(t)$ en $t = 0^+$ et en $t = 0^-$? Exprimer $e(t)$ et en déduire que cet état dure jusqu'à un instant t_1 que l'on déterminera en fonction de R et C .

Un nouveau changement d'état a lieu à l'instant $t = t_1$.

6. Exprimer $s(t_1^+)$ et $e(t_1^+)$ où la notation t_1^+ désigne la limite $t \rightarrow t_1$ par valeur supérieure. Déterminer alors $e(t)$ pour $t > t_1$ et en déduire que cet état dure jusqu'à un instant t_2 que l'on exprimera en fonction de R et C .
7. Avec la même convention, exprimer $s(t_2^+)$ et $e(t_2^+)$, puis $e(t)$ pour $t > t_2$. En déduire l'existence d'un nouvel instant de basculement $t_3 > t_2$ que l'on exprimera en fonction de R et C .
8. Tracer l'allure de $e(t)$ et $s(t)$ sur une durée au moins égale à $2t_3$, en positionnant clairement les instants t_1 , t_2 et t_3 ainsi que les valeurs de e et s correspondantes.
9. Commenter le comportement du circuit et calculer la valeur numérique de la durée caractéristique associée. Proposer une application dans le domaine pour lequel ce circuit a été conçu.

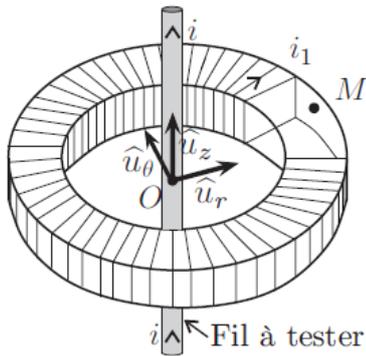


FIGURE 6 – Partie active de la pince

Une pince ampèremétrique est un appareil dont l'extrémité possède la forme d'un tore. En disposant ce tore autour d'un conducteur parcouru par un certain courant le dispositif équipant la pince permet d'en mesurer l'intensité. Son principal intérêt est l'absence de contact physique avec le conducteur et le fait qu'il ne soit pas nécessaire d'ouvrir le circuit pour mesurer le courant qui le traverse contrairement à l'implantation d'un ampèremètre classique.

Le dispositif de mesure de la pince ampèremétrique est formé d'un bobinage torique comportant N spires enroulées sur un tore de section rectangulaire de rayon intérieur a , de rayon extérieur b , d'épaisseur c , d'axe (Oz) . Le fil conducteur utilisé pour le bobinage possède une résistance linéique λ .

Un point M intérieur au tore est repéré par ses coordonnées cylindriques : $\vec{OM} = r\vec{u}_r + z\vec{u}_z$ avec $r \in [a, b]$ et $z \in [0, c]$. Un fil rectiligne infini de même axe (Oz) est parcouru par un courant d'intensité $i(t)$. On note $i_1(t)$ l'intensité du courant circulant dans la bobine torique. On se place dans l'approximation des états quasi-stationnaires.

10. Énoncer le théorème d'Ampère, puis montrer qu'au point M intérieur au tore, le champ magnétique peut se mettre sous la forme $\vec{B} = B(r)\vec{u}_\theta$ où l'on précisera l'expression de $B(r)$ en fonction de μ_0 , $i(t)$, $i_1(t)$, N et r .

11. Calculer le flux Φ de \vec{B} à travers le bobinage et en déduire les expressions des coefficients d'autoinductance L du bobinage et de mutuelle inductance M entre le fil et le bobinage. Déterminer aussi l'expression de la résistance totale R_P du bobinage en fonction de a , b , c , N et λ .

A - Théorie géométrique

Lorsque le soleil éclaire les gouttes d'eau, on peut observer dans certaines conditions un arc-en-ciel. On considère une goutte d'eau sphérique, de diamètre D et d'indice de réfraction n . Les trajets des rayons lumineux sont représentés sur la figure 7. Soit un rayon lumineux incident, arrivant avec un angle d'incidence i (qui n'est pas nécessairement petit) sur la goutte. On note r l'angle de réfraction associé à l'angle d'incidence i . L'indice de l'air vaut $n_{\text{air}} = 1$. On considère un rayon sortant de la goutte d'eau après une seule réflexion à l'intérieur de la goutte et deux réfractions à l'entrée et à la sortie de la goutte (figure 7) : ce rayon est à l'origine de l'arc-en-ciel principal.

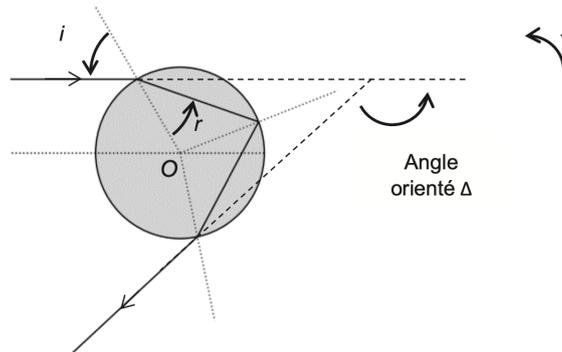


FIGURE 7 – Cas d'une réflexion et de deux réfractions

- 12. Rappeler les lois de Descartes de la réfraction et donner la relation entre l'angle d'incidence i et l'angle de réfraction r .
- 13. La déviation est l'angle dont il faut tourner le rayon incident pour l'amener sur le rayon émergent ; afin d'avoir une valeur positive, on considère ici son opposé, l'angle orienté Δ (figure 7). Montrer que $\Delta = \pi - 4r + 2i$.
- 14. Exprimer l'angle Δ en fonction n et $x = \sin i$.
- 15. Montrer que $\Delta(x)$ passe par un extremum lorsque x a pour valeur :

$$x_m = \sin i_m = \sqrt{\frac{4 - n^2}{3}}$$

- 16. Justifier à l'aide de la figure 8 qu'on observe une accumulation de lumière dans la direction $\Delta_m = \Delta(x_m)$.
- 17. Calculer x_m et Δ_m (en degrés) dans le cas de l'eau, pour le violet ($\lambda_v = 400 \text{ nm}$, $n = 1,343$) et pour le rouge ($\lambda_r = 700 \text{ nm}$, $n = 1,330$).
- 18. Sur un schéma faisant apparaître les rayons incidents, parallèles, le rideau de pluie et l'œil de l'observateur, tracer les rayons émergents rouge et bleu dans la direction Δ_m . L'observateur voit-il le rouge à l'intérieur ou à l'extérieur de l'arc ?

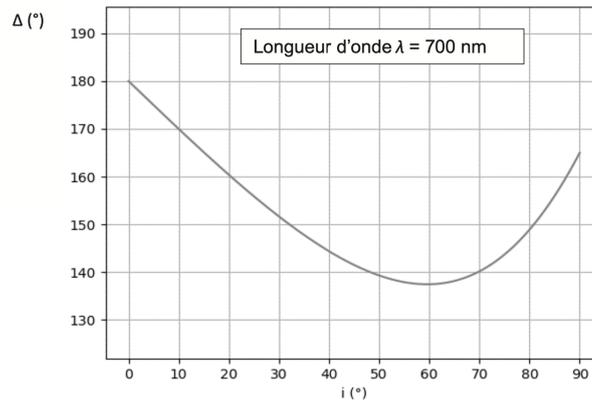


FIGURE 8 – Déviation en fonction de l'angle d'incidence

B - Théorie ondulatoire

Ces premières questions ont pour but de rappeler certaines conditions d'observation des interférences lumineuses.

Deux sources lumineuses ponctuelles S_1 et S_2 émettent deux ondes électromagnétiques monochromatiques de pulsations respectives ω_1 et ω_2 . Ces deux ondes se propagent dans un milieu d'indice n et interfèrent en un point P après avoir parcouru les distances $x_1 = S_1P$ et $x_2 = S_2P$. On modélise les amplitudes des ondes en P par les grandeurs scalaires :

$$s_{1,2}(P, t) = a_{1,2} \cos(\omega_{1,2}t - k_{1,2}x_{1,2} + \varphi_{1,2})$$

avec $k_{1,2} = n \frac{\omega_{1,2}}{c}$, $a_{1,2}$ et $\varphi_{1,2}$ des constantes.

19. Donner un ordre de grandeur de ω_1 et ω_2 pour la lumière visible.

20. L'intensité lumineuse $I(P)$ observée à l'œil nu en P est proportionnelle à la valeur moyenne du carré de l'amplitude reçue en P , soit : $I(P) = K \langle s^2(P, t) \rangle$. Sur quelle durée τ cette valeur moyenne est-elle calculée ?

21. Calculer l'intensité $I(P)$ et montrer qu'elle s'écrit :

$$I(P) = I_1(P) + I_2(P) + I_{1,2}(P)$$

22. À quelle(s) condition(s) le terme $I_{1,2}(P)$ est-il non nul ?

23. On suppose dans la suite que $\omega_1 = \omega_2$ et $\varphi_1 = \varphi_2$. Montrer que l'intensité au point P s'écrit :

$$I(P) = I_1(P) + I_2(P) + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi\delta(P)}{\lambda}\right)$$

où λ est la longueur d'onde dans le vide. La grandeur $\delta(P)$ sera exprimée en fonction de l'indice du milieu n , de x_1 et x_2 .

Il est possible (figure 9) dans un arc-en-ciel d'observer, outre les arcs décrits par l'optique géométrique, un phénomène d'interférences responsable d'arcs dits "surnuméraires".

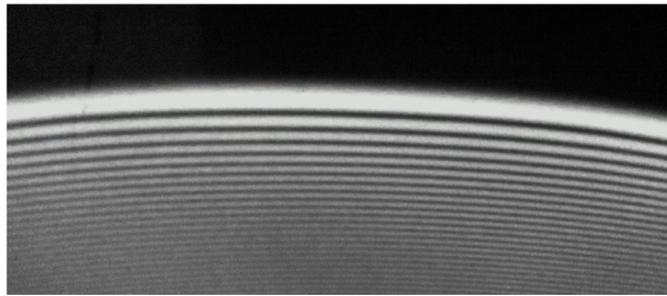


FIGURE 9 – Franges d'interférences obtenues en lumière monochromatique avec une goutte d'eau

24. Représenter la courbe $I(P)$ en fonction de $\delta(P)$. En observant la figure 3, que peut-on dire de I_1 et I_2 ?
On considère (figure 10) deux rayons d'incidences i_1 et i_2 , voisins du rayon d'incidence i_m (en pointillés) sur une goutte d'eau, se réfléchissant une seule fois à l'intérieur de la goutte d'eau et émergeant dans des directions parallèles.

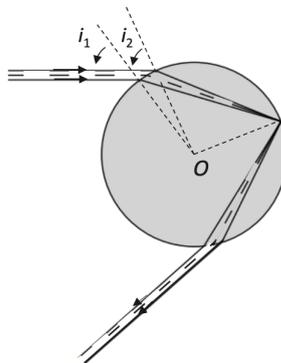


FIGURE 10 – Rayons responsables des interférences

25. Où ces rayons interfèrent-ils ?

On admet que la différence de marche en un point P du champ d'interférences s'écrit :

$$\delta(P) = D(\cos i_2 - \cos i_1) - 2Dn(\cos r_2 - \cos r_1)$$

26. Exprimer la condition permettant d'observer des interférences constructives. L'écart angulaire entre les franges est-il plus grand pour les petites ou les grosses gouttes ? Justifier qualitativement.

27. Les rayons incidents d'angles d'incidence $i_1 = 50,13^\circ$ et $i_2 = 67,98^\circ$ donnent pour une radiation rouge ($\lambda = 700$ nm, $n = 1,330$) des rayons émergents parallèles. Quel diamètre de goutte permettra d'observer la frange claire d'ordre -2 dans la direction des rayons émergents ?

On considère (figure 11) un faisceau de lumière parallèle de longueur d'onde λ , se propageant dans la direction Oz . Ce faisceau arrive sur un écran placé dans le plan xOy ($z = 0$), percé de deux trous identiques T_1 et T_2 . Les centres des trous O_1 et O_2 ont pour coordonnées respectivement $(a/2, 0, 0)$ et $(-a/2, 0, 0)$. Le rayon des trous est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Ceci permet de supposer qu'il existe un champ d'interférences qui est la zone commune aux deux faisceaux diffractés par les trous. On modélise chaque trou par une source secondaire ponctuelle émettant une lumière uniforme dans le champ d'interférences. Ces sources secondaires sont cohérentes entre elles.

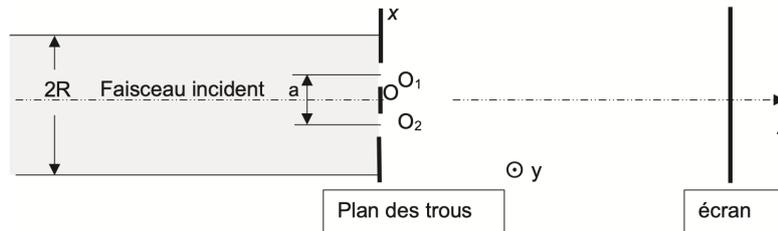


FIGURE 11 – Géométrie du dispositif à deux trous

On observe sur un écran placé dans le plan $z = D$, en un point M de coordonnées (x, y, D) . On suppose que D est très grand devant a , $|x|$ et $|y|$. Le montage est réalisé dans l'air d'indice égal à l'unité.

- 28. De quel type de division interférentielle s'agit-il ? Les interférences sont-elles localisées ?
- 29. Établir (dans le cadre de l'approximation scalaire de l'optique) l'expression de la différence de marche $\delta(M)$
- 30. Établir l'expression de l'intensité $I(M)$ au point M en notant I_{\max} l'intensité maximale.
- 31. Décrire ce qu'on doit voir sur l'écran dans le cadre de ces hypothèses et exprimer l'interfrange i en fonction de la fréquence d'émission ν , de c et des paramètres géométriques du dispositif.
- 32. Pourquoi, dans ce cadre, peut-on remplacer les deux trous par deux fentes fines identiques parallèles à Oy ? Quel en est l'intérêt ? La figure est-elle transformée si on translate de façon "raisonnable" en bloc les fentes dans leur plan ?

La source est en réalité quasi-monochromatique à profil spectral "rectangulaire" de largeur $\Delta\lambda$ autour de λ_0 , avec $\Delta\lambda \ll \lambda_0$. Ce profil spectral, en fonction de la fréquence d'émission, est représenté sur la figure 6. On admet que l'intensité émise par une bande spectrale de largeur $d\nu$ autour de ν vaut $dI = J_\nu d\nu$.

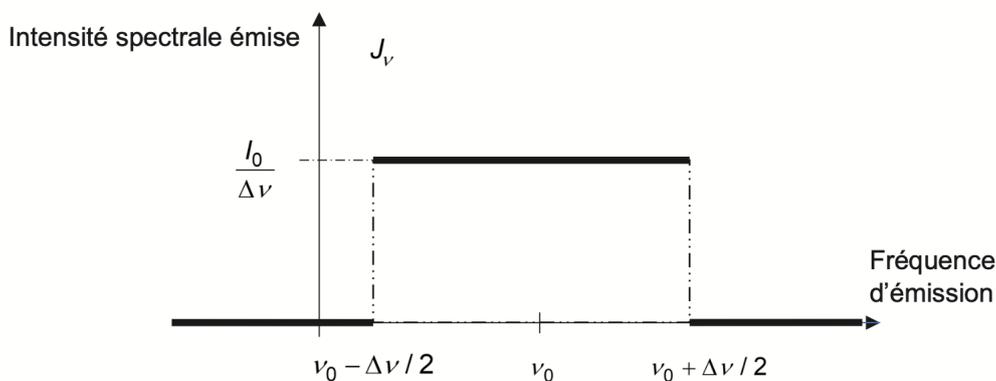


FIGURE 12 – Profil "rectangulaire" d'une source quasi-monochromatique. Par commodité de représentation, l'échelle n'est pas respectée.

33. Établir l'expression de l'intensité $I(M)$ au point M en notant I_{\max} l'intensité maximale et montrer qu'elle peut s'écrire sous la forme

$$I(M) = \frac{I_{\max}}{2} \left[1 + V(M) \cos\left(\frac{2\pi x}{i}\right) \right]$$

avec i l'interfrange correspondant à la valeur centrale de la raie.

34. Exprimer la visibilité $V(M)$ correspondante.

35. Exprimer en fonction de $\Delta\lambda$ et λ_0 la longueur de cohérence L , c'est-à-dire la plus petite valeur de la différence de marche δ à partir de laquelle les franges ne sont plus visibles. Vérifier que ce résultat correspond au critère de brouillage des franges portant sur l'ordre d'interférences.

36. On rappelle le lien entre les deux largeurs spectrales : $\Delta\nu = \frac{c}{\lambda_0^2} \Delta\lambda$. Établir la durée τ des trains d'onde ou temps de cohérence.

37. Justifier pourquoi on définit le nombre d'interfranges visibles par $N = 2L/\lambda_0$.

38. Dans le tableau ci-dessous sont indiquées des caractéristiques de sources quasi-monochromatiques. Après l'avoir recopié sur votre copie, le compléter et le commenter.

Source	λ_0 en nm	$\Delta\lambda$ en nm	τ en s	L en m	N
Laser He-Ne	632,991	0,001	?	?	?
Raie rouge de l'hydrogène	656,2	0,1	?	?	?
Lumière blanche filtrée	500	20	?	?	?

Dans la suite de cette partie, on considère que la source est rigoureusement monochromatique de longueur d'onde λ . Une troisième fente, identique aux deux autres, parallèle à Oy , est placée en $O(0,0,0)$. Le plan des trois fentes est placé orthogonalement à l'axe de révolution commun de deux lentilles minces convergentes de distance focale 50cm. La lumière provient d'une fente source monochromatique, parallèle aux fentes diffractantes, placée au foyer principal objet de la première lentille (lentille d'entrée). L'écran d'observation est confondu avec le plan focal image de la seconde lentille (lentille de sortie), placée en aval du plan percé.

39. Faire une représentation schématique du montage, où l'on représentera les cheminements des trois rayons qui interfèrent en un point M de l'écran.

40. Établir la nouvelle fonction intensité $I(\varphi)$ en posant $\varphi = 2\pi \frac{ax}{\lambda f'}$. On fera figurer l'intensité I_0 qui correspondrait à celle d'une fente unique identique.

41. Représenter, sur un même graphe, les fonctions intensités $I(\varphi)$ pour les deux fentes étudiées précédemment, ainsi que pour les trois fentes, en fonction de la variable φ sur l'intervalle $[0, 2\pi]$.

42. Commenter en comparant la luminosité et la largeur des zones les plus brillantes.

43. On donne sur la figure 13 ce qu'on voit sur l'écran pour une lumière monochromatique rouge de longueur d'onde $\lambda = 633 \text{ nm}$. À partir de cette photo, évaluer la distance entre les deux fentes en considérant que seule la zone comprise entre les abscisses $x = 2,1 \text{ mm}$ et $x = -2,1 \text{ mm}$ correspond au calcul de l'intensité tel qu'il a été fait, c'est-à-dire sans tenir compte de la largeur des fentes diffractantes.

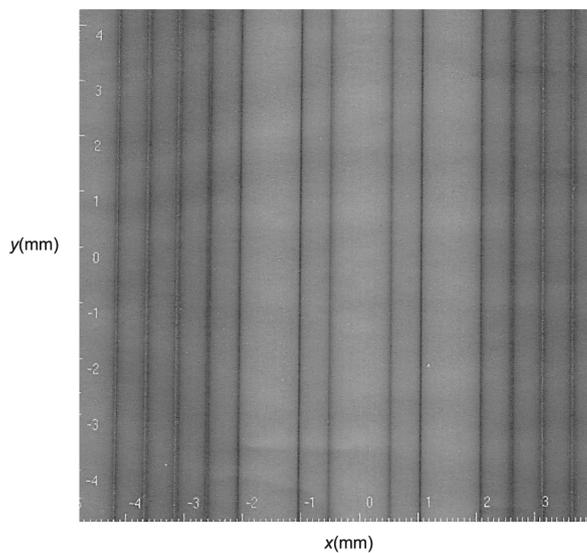


FIGURE 13 – Interférences à 3 fentes. Les graduations sont en mm.

Partie V - Franges qui bougent

(Problème ouvert)

On observe une étoile supposée ponctuelle à l'aide d'un télescope dont l'axe est placé verticalement à l'équateur. Devant le télescope est disposé un système de fentes de Young ainsi qu'un filtre ne laissant passer qu'une seule longueur d'onde.

44. Quelle est la période de défilement des franges ?

Partie VI - Prospection pétrolière

(Centrale - 2021)

Avant d'être acheminé par oléoduc, le pétrole doit être détecté dans le sous-sol puis extrait. La méthode de prospection dite « sismique réflexion » est couramment employée. Cette technique indirecte passe par l'analyse de la propagation d'ondes sismiques dans le sol, permettant de découvrir des pièges, c'est-à-dire des structures géologiques susceptibles de contenir des hydrocarbures, tels les anticlinaux. On étudie dans cette partie une méthode de prospection complémentaire, qui consiste à détecter les variations du champ de pesanteur dues à la présence d'une nappe de pétrole dans le sous-sol. Cette technique est donc basée sur la gravimétrie.

On cherche à estimer la variation Δg du champ gravitationnel, qu'on suppose ici confondu avec le champ de pesanteur, détectée par un avion qui survole la région prospectée. Dans le premier cas, l'avion survole une étendue supposée plane et homogène. Le champ gravitationnel vaut alors $-g\vec{u}_z$. Dans le second cas, l'avion survole une zone identique à ceci près qu'une nappe de pétrole, assimilée à une couche plane homogène d'épaisseur H , est présente dans le sous-sol. Le champ de pesanteur mesuré est alors $-(g - \Delta g)\vec{u}_z$. On note ρ_s la masse volumique du sol et ρ_P celle du pétrole.

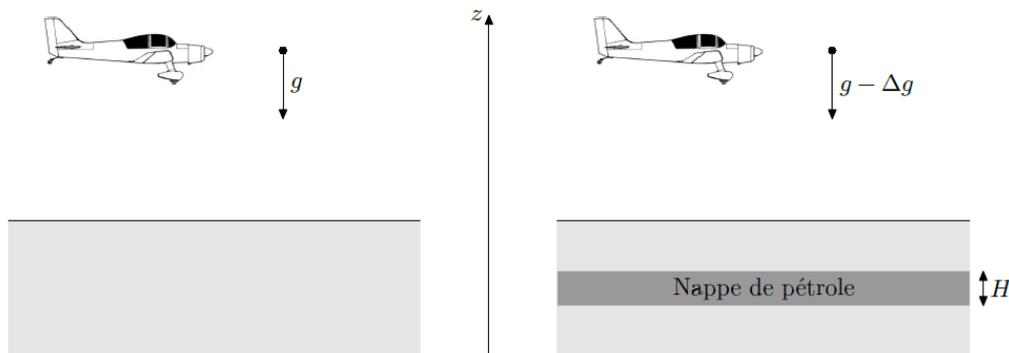


FIGURE 14 – Détection d'une nappe de pétrole

Afin d'exprimer Δg , on s'intéresse tout d'abord au calcul du champ gravitationnel \vec{g}_c créé à l'extérieur d'une couche plane homogène d'épaisseur H et de masse volumique ρ_c , supposée seule dans l'espace.

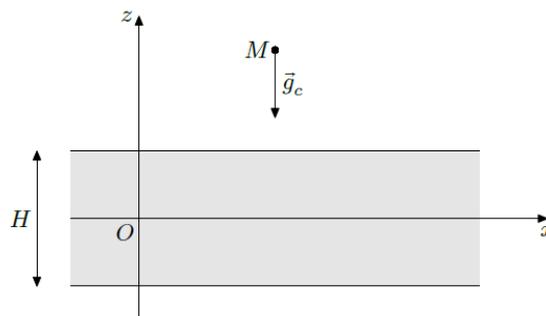


FIGURE 15 – Champ gravitationnel créé par une couche plane

La couche plane est comprise entre les plans d'équations $z = -H/2$ et $z = +H/2$. Elle est supposée d'extension spatiale infinie selon les directions (Ox) et (Oy) (les effets de bord sont donc négligés). Le théorème de Gauss pour le champ gravitationnel \vec{g}_c s'écrit :

$$\oiint_{\Sigma} \vec{g}_c \cdot d\vec{S} = -4\pi GM_i$$

avec M_i la masse intérieure à la surface fermée Σ et $G = 6,67 \times 10^{-11}$ la constante gravitationnelle.

45. Rappeler les expressions de la force d'interaction électrostatique \vec{F}_e subie par une charge ponctuelle q_A placée au point A de la part d'une charge ponctuelle q_B placée au point B ainsi que de la force d'attraction gravitationnelle \vec{F}_g subie par une masse ponctuelle m_A placée au point A de la part d'une masse ponctuelle m_B placée au point B .

46. En déduire par des analogies à préciser comment on passe du théorème de Gauss pour le champ électrostatique au théorème de Gauss pour le champ gravitationnel.

47. Justifier le fait que le champ gravitationnel a pour forme $\vec{g}_c = g_c(z)\vec{u}_z$.

48. Établir, en illustrant votre démonstration par une figure avec une légende explicite, que $g_c = -2\pi G\rho_c H$ dans toute la partie située au-dessus de la couche plane.

49. Exprimer l'anomalie gravitationnelle Δg en fonction de G , H , ρ_p et ρ_s . Calculer Δg . Donnée : $H = 200$ m.

- Fin du sujet -