

SESSION 2021

**AGRÉGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

Section : PHYSIQUE CHIMIE

**COMPOSITION SUR LA PHYSIQUE
ET LE TRAITEMENT AUTOMATISÉ DE L'INFORMATION**

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, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1500C	101	0385

► **Concours interne du CAER / Agrégation de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1500C	101	0385

Les systèmes microélectromécaniques

MEMS

“Microelectromechanical systems”

Bénéficiant des techniques de fabrication des composants électroniques, les capteurs et actionneurs mécaniques ont pu être fabriqués à l'échelle micrométrique. En s'inspirant des procédés utilisés en microélectronique pour le silicium, de nouvelles « puces » apparaissent dès les années 1980, intégrant des capteurs (d'accélération, de pression, de température, etc.), du traitement des données et d'éventuels actionneurs. Ces systèmes sont appelés MEMS pour *microelectromechanical systems*. Ils sont étudiés au travers de trois applications différentes constituant chacune une partie du sujet. Les trois parties sont indépendantes.

La première partie porte sur l'accéléromètre capacitif présent aujourd'hui dans de nombreux équipements comme les smartphones ou les *airbags* des voitures.

Lorsque les MEMS sont associés à l'optique, on parle de MOEMS. La deuxième partie traite des interféromètres miniatures. Avec un tel système, il est envisageable de réaliser des analyses spectroscopiques appliquées à un nouveau type d'imagerie dite hyperspectrale et ainsi de rendre compte de la constitution chimique des objets observés.

Dans une dernière partie, les MEMS sont constitués de microcanaux dans lesquels des fluides s'écoulent. Les résultats obtenus sont utilisés pour mesurer la valeur de la viscosité d'un fluide et fabriquer un viscosimètre miniature.

Les questions de nature pédagogique sont identifiées par le symbole (QP). Elles représentent environ vingt pour cent du total des points attribués.

Constantes fondamentales et données :

- accélération de la pesanteur terrestre : $9,81 \text{ m.s}^{-2} = 1,00 g$
- permittivité diélectrique du vide : $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
- constante d'Avogadro : $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- masse volumique de l'eau liquide à $P^\circ = 10^5 \text{ Pa}$ et $T = 20^\circ\text{C}$: $\rho_0 = 1,00 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
- viscosité dynamique de l'eau à $P^\circ = 10^5 \text{ Pa}$ et $T = 20^\circ\text{C}$: $\eta = 1,00 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$

Plan

- I. Accéléromètre MEMS
- II. Détecteur hyperspectral MOEMS
- III. Viscosimètre MEMS

Annexes

Annexe 1 : séance expérimentale en classe de troisième

Annexe 2 : extrait du programme de physique-chimie du cycle 4

Annexe 3 : quelques images extraites du film de la collision d'un véhicule contre un mur. Vues latérales droites et gauches

Annexe 4 : séance expérimentale conduite dans le cadre de l'enseignement de spécialité de physique-chimie de la classe de terminale générale

Annexe 5 : étude de la réfraction en classe de seconde générale et technologique

Annexe 6 : fonction de transmittance de l'interféromètre

Annexe 7 : activité expérimentale en STL-SPCL

Document-réponse à rendre avec les copies

Document réponse 1 : Copie d'élève

I. Accéléromètre MEMS

Les premiers accéléromètres utilisant des MEMS datent de 1980 et sont utilisés pour déclencher des airbags. À la suite d'une forte diminution de leur prix et de leur miniaturisation, ils sont présents dans les consoles de jeux vidéo puis dans les smartphones où ils jouent un rôle important : orientation portrait/paysage, stabilisation photographique, etc.

Un exemple de structure interne d'un accéléromètre uniaxe est présenté sur la figure 1. L'image obtenue en microscopie électronique à balayage montre une structure en deux parties imbriquées : un bâti rigide dans lequel peut se déplacer une masse « sismique » notée M. Une accélération de l'ensemble provoque le déplacement de M par rapport au bâti. Chaque partie comporte un double peigne, et l'imbrication des dents forme un condensateur. Une mesure électrique de sa capacité permet de remonter à la valeur de l'accélération.

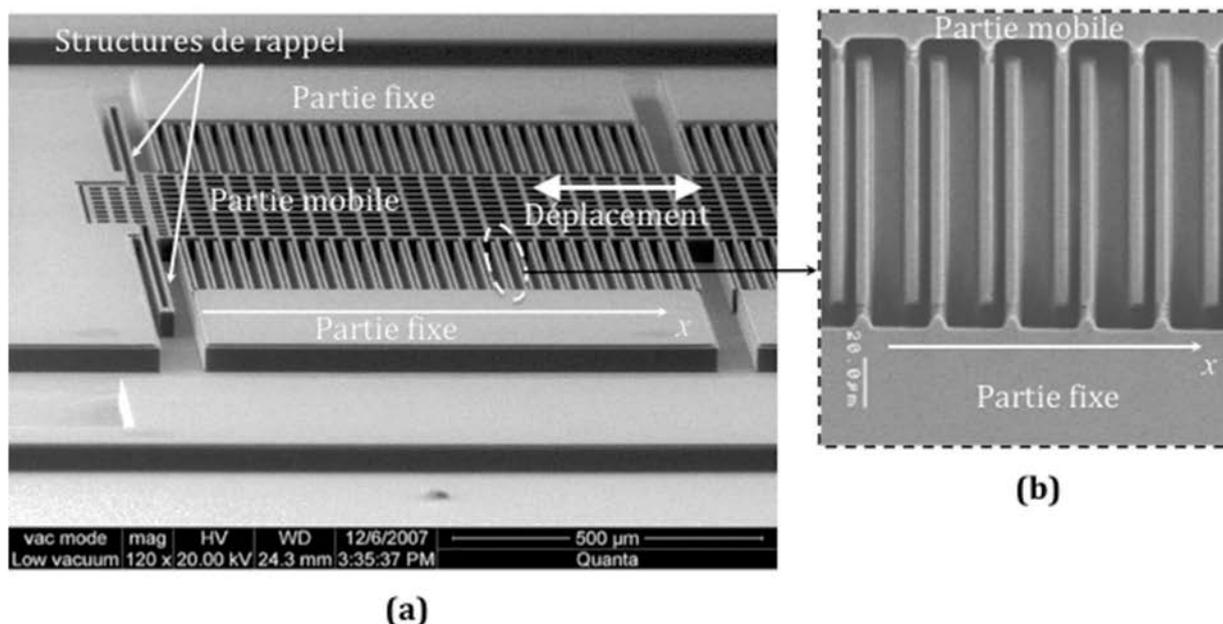


Figure 1 : (a) image d'un MEMS accéléromètre uniaxe réalisée en microscopie électronique à balayage, la direction du déplacement possible est symbolisée par une double flèche, (b) détail de l'imbrication des peignes des parties mobile et fixe lors d'une accélération. D'après G. Dai et al., Sensors and Actuators A : Physical, 172, (2011), 369– 378.

Le principe de fonctionnement mécanique puis électrique des accéléromètres est étudié dans les parties A et B. La partie C traite de la mise en forme et du conditionnement du signal de sortie de l'accéléromètre. Enfin, la partie D s'intéresse à une application pratique utilisant un microcontrôleur dans une situation d'enseignement en spécialité physique-chimie de la classe de terminale de la voie générale.

A. Comportement mécanique de l'accéléromètre

À l'instant t , l'accéléromètre est soumis à une accélération par rapport au référentiel du laboratoire supposé galiléen.

Le modèle équivalent utilisé est réduit à une dent mobile M, de masse $m = 0,14 \cdot 10^{-9}$ kg, entourée de deux dents fixées au bâti de l'accéléromètre. Il est représenté sur la figure 2. Les dents du bâti sont séparées d'une distance $2d = 1,3 \mu\text{m}$. Des structures de rappel lient M au bâti, elles sont modélisées par des ressorts de rappel identiques de raideur $k = 1,2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, de longueur à vide l_0 . Au repos, en l'absence d'accélération, leur longueur vaut l_0 . Leurs actions sur M sont modélisées par deux forces notées \vec{F}_1 et \vec{F}_2 .

Un axe (Ox) , de vecteur unitaire \vec{u}_x est lié au bâti de l'accéléromètre, son origine O coïncide avec la position au repos de M, par rapport au référentiel du bâti. La coordonnée $x(t)$ désigne la position

du centre de masse de M. L'accélération du référentiel lié au bâti de l'accéléromètre par rapport au référentiel du laboratoire nommée $\vec{a}_e(t)$ s'écrit $\vec{a}_e(t) = a_e(t)\vec{u}_x$.

M subit également des frottements modélisés par deux amortisseurs identiques dont l'ensemble exerce une action modélisée par une force résultante \vec{F}_{tot} opposée au mouvement. \vec{F}_{tot} s'écrit sous la forme : $\vec{F}_{\text{tot}} = -2\alpha \frac{dx(t)}{dt} \vec{u}_x$, où α désigne une constante, $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

On étudie le mouvement du système M, dans le référentiel lié au bâti de l'accéléromètre supposé non galiléen, le but étant de déterminer $a_e(t)$.

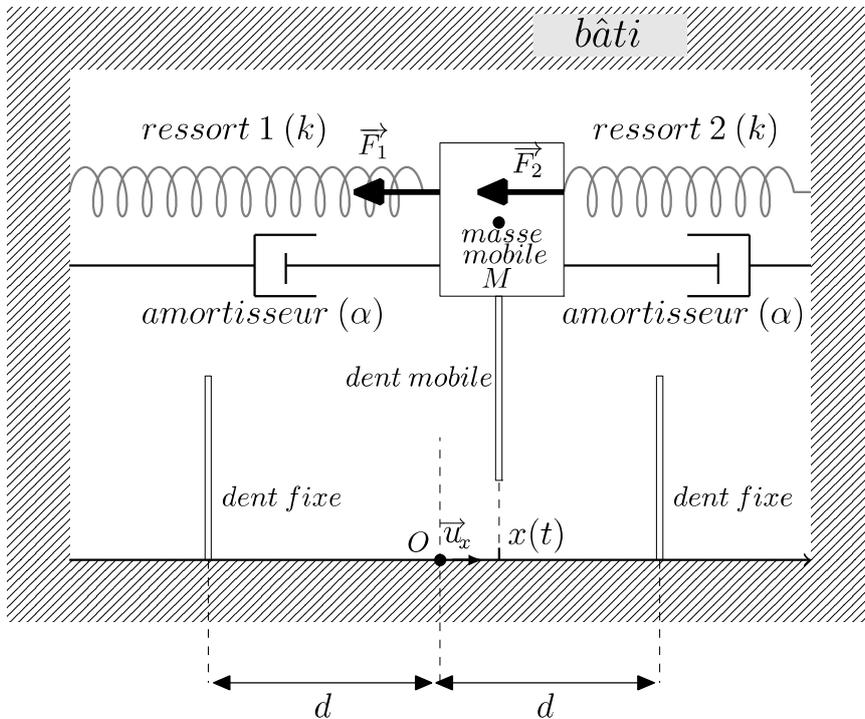


Figure 2 : modèle uniaxe d'accéléromètre.

Pour établir la relation entre le déplacement $x(t)$ et $a_e(t)$, on se place dans la situation correspondant à la figure 2.

1. L'intensité de la force de rappel d'un ressort s'écrit sous la forme $\|\vec{F}\| = k|l(t) - l_0|$, où $l(t)$ désigne la longueur du ressort. Établir soigneusement que l'expression de la résultante des forces de rappel $\vec{F}_1 + \vec{F}_2$ s'exerçant sur M s'écrit $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = -2kx(t)\vec{u}_x$.
2. Rappeler l'expression de la force d'inertie d'entraînement \vec{F}_i à prendre en compte dans un bilan de forces s'exerçant sur M effectué dans le référentiel de l'accéléromètre en fonction de m et $\vec{a}_e(t)$.
3. En déduire l'équation différentielle du second ordre vérifiée par $x(t)$ en fonction de $a_e(t)$, α , k et m .
4. Identifier dans l'équation différentielle précédente les expressions de la pulsation propre ω_0 et du facteur de qualité Q , pour l'écrire sous la forme de l'équation (1) :

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) = -a_e(t) \quad (1)$$

Pour réaliser une analyse harmonique de la réponse du système, on introduit $a_e(t) = a \cdot \cos(\omega t)$ écrit en notation complexe $\underline{a}_e(t) = a \cdot e^{j\omega t}$, avec $j^2 = -1$. On s'intéresse dans la suite au régime

sinusoïdal forcé et on cherche l'expression du déplacement de la partie mobile de l'accéléromètre sous la forme $\underline{x}(t) = \underline{X}(\omega)e^{j\omega t}$; $\underline{X}(\omega)$ désigne l'amplitude complexe de $\underline{x}(t)$.

5. Déterminer l'expression du rapport $\frac{\underline{X}(\omega)}{a}$ en fonction de ω , ω_0 et Q . Comment, en fonction de la valeur du facteur de qualité, varie l'amplitude du déplacement lorsque la fréquence de l'accélération augmente ?
6. Pour une oscillation mécanique associée à la marche d'un utilisateur de smartphone, proposer une expression approchée de $\frac{\underline{X}(\omega)}{a}$. À quelle condition sur le contenu fréquentiel de $a_e(t)$ la mesure du déplacement $x(t)$ permet-elle d'en déduire directement $a_e(t)$?
7. La sortie de l'accéléromètre ADXL1001 est proportionnelle à $x(t)$. Sa réponse spectrale normalisée à sa valeur statique à 0 Hz est représentée sur la figure 3. Comparer les valeurs numériques de ω_0 du modèle étudié à celles de l'ADXL1001. Que peut-on dire sur l'ordre de grandeur de Q à la lecture de cette courbe ? Quel est le domaine fréquentiel d'utilisation de ce composant ? Quelle peut être la raison d'une limitation de son fonctionnement à $\pm 100g$ où g désigne l'accélération de la pesanteur ?

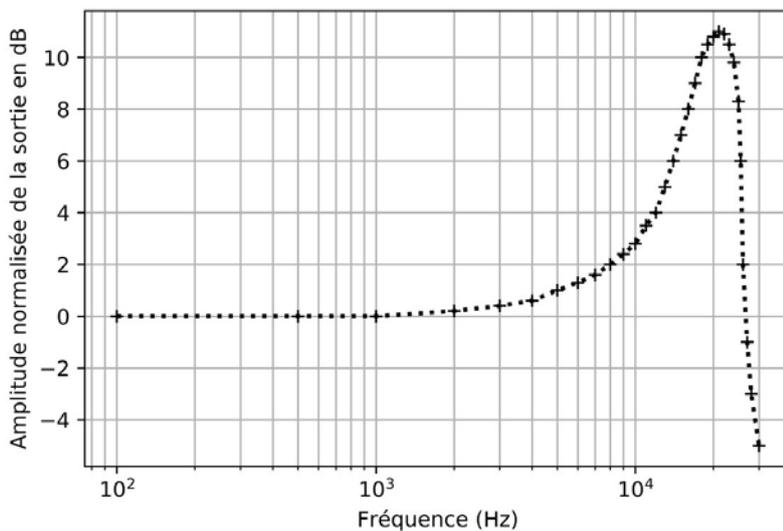


Figure 3 : sortie normalisée par rapport à sa valeur à 0 Hz de l'accéléromètre ADXL1001 d'Analog Devices en fonction de la fréquence.

Un enseignant de collège souhaite utiliser l'accéléromètre intégré dans un smartphone pour aborder la notion d'intensité d'accélération de pesanteur en classe de troisième et comparer cette valeur avec celle déduite de mesures réalisées à l'aide d'un dynamomètre.

Le début du texte fourni aux élèves est donné dans **l'annexe 1**. Un extrait du programme de physique-chimie du cycle 4 figure dans **l'annexe 2**.

8. **(QP)** Comment aborder la problématique de l'incertitude de mesure sur l'exemple de la détermination de « g », au niveau du collège, en utilisant chacune des deux expérimentations de cette activité ?

Un collégien lit dans une revue « qu'un pèse-lettre ou une balance pèse personne ne permettent pas de mesurer directement une masse » et ne comprend pas cette phrase.

9. **(QP)** Quelle explication est-il possible de lui apporter pour justifier ou réfuter cette affirmation ? Quelle méthode simple peut être proposée à l'élève pour mesurer directement une masse ?

B. Mesure capacitive

Une mesure des capacités des condensateurs formés entre les faces de la dent mobile et des dents fixées au bâti de l'accéléromètre permet de déterminer $x(t)$. Les dimensions des armatures sont telles qu'il est possible d'utiliser le modèle du condensateur plan infini. Dans ce cadre, on détermine d'abord le champ électrique créé par un plan infini chargé uniformément en surface, puis l'expression de la capacité d'un condensateur plan infini pour enfin l'appliquer au cas de l'accéléromètre.

Champ électrique créé par un plan infini chargé uniformément en surface

On considère un plan infini portant la densité surfacique de charges σ , $\sigma > 0$, supposée uniforme. On note O' un point du plan, \vec{u}_x le vecteur unitaire normal au plan et $O'x$ l'axe orienté associé.

10. Préciser les invariances et les symétries du champ électrique \vec{E} créé par ce plan. Préciser en particulier la relation existante entre $\vec{E}(x)$ et $\vec{E}(-x)$?
11. Rappeler l'écriture intégrale du théorème de Gauss de l'électrostatique dans le vide.
12. Établir, en appliquant le théorème de Gauss, que le champ électrique $\vec{E}(x)$ s'écrit $\vec{E}(x) = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \vec{u}_x$ pour $x > 0$. Préciser son expression pour $x < 0$.

Capacité d'un condensateur plan infini

Un condensateur plan infini est constitué de deux plans parallèles de surface S espacés de la distance δ , telle que $S \gg \delta^2$, portant des charges opposées uniformément réparties en surface (figure 4). Les densités surfaciques de charges sont notées $\pm\sigma$. Les électrodes en regard sont supposées être en influence totale, séparées par du vide de permittivité ϵ_0 . En raison de la taille des électrodes et de leur espacement, les effets de bords sont négligeables, la structure est assimilable à un condensateur plan infini.

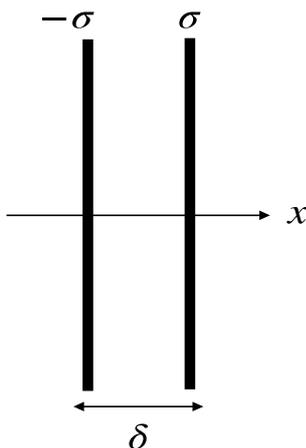


Figure 4 : modèle du condensateur plan infini.

13. Déterminer en utilisant la superposition de deux distributions de charges, l'expression du champ \vec{E} entre les armatures. En déduire une expression de la capacité C de ce condensateur en fonction de S , ϵ_0 et δ .

Expression des capacités de l'accéléromètre

Dans l'accéléromètre étudié, la dent mobile porte la charge $+q(t)$ répartie uniformément sur chacune de ses deux faces (figure 5). Sa charge totale est donc de $+2q(t)$. Les faces en regard des dents fixes 1 et 2 portent chacune la charge $-q(t)$. L'ensemble est assimilable à deux condensateurs de capacité C_1 et C_2 .

En l'absence d'accélération, $x(t) = 0$ et C_1 et C_2 sont égales. Lors d'une accélération, la distance séparant les armatures valent respectivement $d + x(t)$ et $d - x(t)$.

La profondeur des dents vaut $a = 2,0 \mu\text{m}$, leur hauteur est égale à $h = 130 \mu\text{m}$ et on rappelle que $2d = 1,3 \mu\text{m}$. Les dimensions des électrodes étant telles que $S \gg \delta^2$, les effets de bords sont négligés et les résultats précédents du condensateur plan infini peuvent s'appliquer.

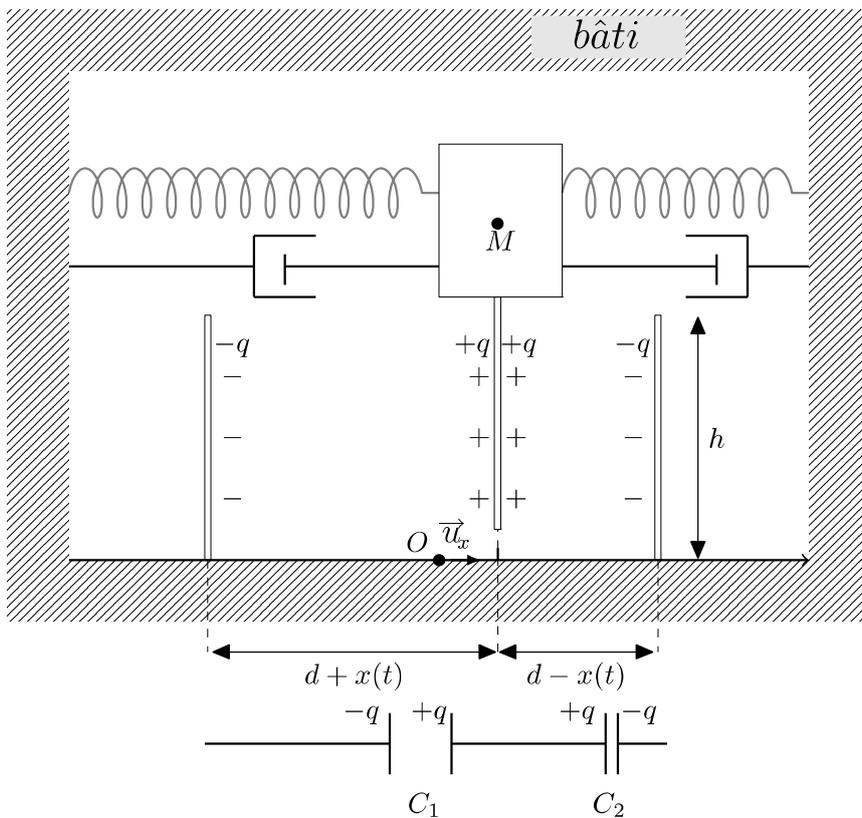


Figure 5 : modèle électrique de l'accéléromètre utilisé pour déterminer $x(t)$. Les échelles ne sont pas respectées.

14. Montrer que la capacité C_1 s'écrit $C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d+x(t)}$. Calculer la valeur numérique de la capacité C_1 pour $x(t) = 0$ et la commenter.
15. Par la suite, il sera utile d'exprimer le rapport $\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$. Montrer qu'il peut s'écrire $\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \gamma \frac{x}{d}$ et préciser la valeur de γ .

C. Conditionnement du signal

La figure 6 représente le schéma du montage nécessaire à la mesure relative des valeurs des capacités C_1 et C_2 pour obtenir $x(t)$.

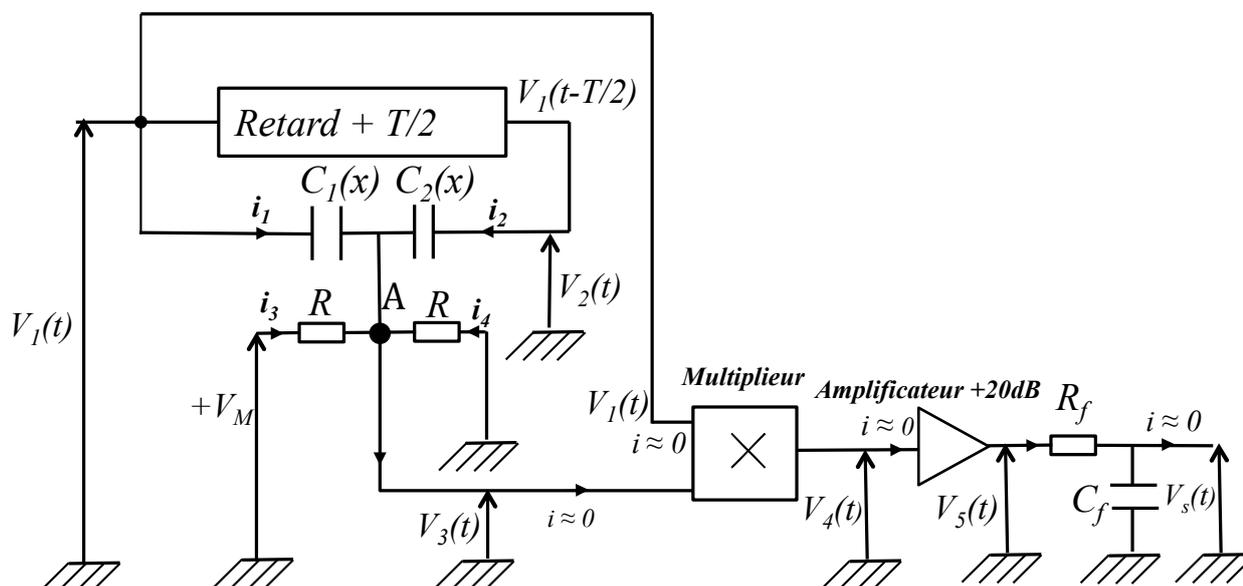


Figure 6 : montage permettant d'obtenir une sortie $V_s(t)$ liée à $x(t)$ à partir d'une mesure entre C_1 et C_2 .

Un oscillateur délivre un signal carré de référence $V_1(t)$ (représenté sur la figure 7(a)), de fréquence $f_o = \frac{1}{T} = 200$ kHz de pulsation $\Omega = 2\pi f_o$, de valeur maximale $V_M = 5,0$ V et de valeur minimale 0 V. $V_1(t)$ est reliée à C_1 , et $V_2(t)$ correspondant à $V_1(t)$ retardé d'une demi période (c'est à dire $V_1\left(t - \frac{T}{2}\right) = V_2(t)$) est reliée à l'électrode de droite de C_2 .

Sur la figure 7(b) est représentée la décomposition spectrale de $V_1(t)$.

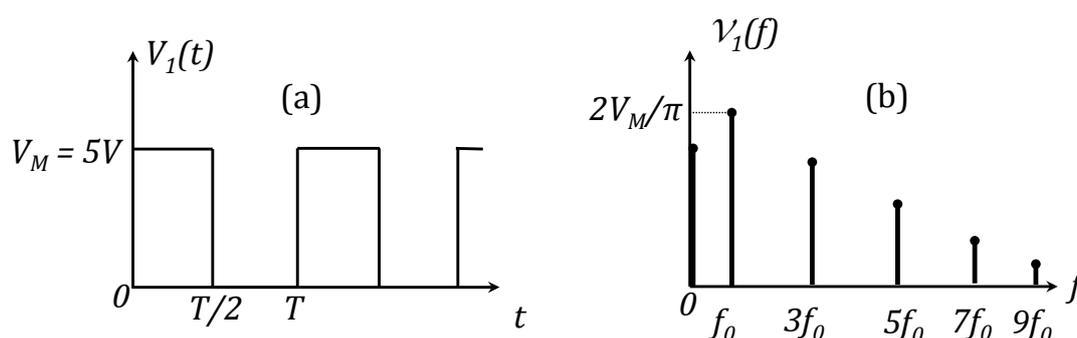


Figure 7 : (a) signal carré $V_1(t)$ de fréquence f_o oscillant entre 0 et V_M ; (b) décomposition harmonique de $V_1(t)$.

16. La moyenne $\langle F \rangle$ d'une fonction F , T -périodique, se calcule de la manière suivante :

$$\langle F \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt. \text{ En déduire la valeur moyenne } \langle V_1 \rangle \text{ de } V_1(t) \text{ en fonction de } V_M.$$

Dans le montage étudié, les bandes-passantes des différents composants sont telles qu'il est inutile de considérer les composantes spectrales au-delà du fondamental du signal $V_1(t)$.

17. À partir de cette hypothèse, du schéma de la figure 6 et de la décomposition harmonique de la figure 7(b), justifier que les potentiels $V_1(t)$ et $V_2(t)$ peuvent se mettre sous les formes approchées suivantes où on donnera l'expression de V_{01} en fonction de V_M :

$$V_1(t) = \frac{V_M}{2} + V_{01} \sin(\Omega t) \quad V_2(t) = \frac{V_M}{2} - V_{01} \sin(\Omega t)$$

L'impédance d'entrée du multiplieur est suffisamment grande pour pouvoir considérer ses courants d'entrée comme nuls. Les courants dans les branches liées au nœud A sont définis sur la figure 6.

18. Dans le but d'établir l'équation différentielle reliant $V_3(t)$ à $V_1(t)$, $V_2(t)$ et V_M et pour simplifier les calculs, on suppose que les signaux sont sinusoïdaux ce qui permet d'utiliser les notations complexes associées. L'équation obtenue reste vraie pour tout type de signal.

En utilisant les impédances équivalentes du condensateur et de la résistance, exprimer \underline{i}_1 en fonction de \underline{V}_3 , \underline{V}_1 et $jC_1\Omega$; puis \underline{i}_2 en fonction de \underline{V}_3 , \underline{V}_2 et $jC_2\Omega$; \underline{i}_3 en fonction de \underline{V}_M , \underline{V}_3 et R , et enfin \underline{i}_4 en fonction de \underline{V}_3 et R .

19. Dédurre des quatre relations précédentes et de la loi des nœuds en A, l'équation différentielle (2) sur $V_3(t)$ dont la validité dépasse le cadre du régime sinusoïdal :

$$(C_1 + C_2) \frac{dV_3(t)}{dt} + \frac{2}{R} V_3(t) = C_1 \frac{d}{dt} \left(\frac{V_M}{2} + V_{01} \sin(\Omega t) \right) + C_2 \frac{d}{dt} \left(\frac{V_M}{2} - V_{01} \sin(\Omega t) \right) + \frac{V_M}{R} \quad (2)$$

20. En introduisant $\tau = \frac{R(C_1+C_2)}{2}$ où τ désigne un temps caractéristique de l'évolution de $V_3(t)$, réécrire l'équation (2) sous la forme de l'équation (3)

$$\frac{dV_3(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} V_3(t) = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \Omega V_{01} \cos(\Omega t) + \frac{V_M}{2\tau} \quad (3)$$

On utilise par la suite un temps τ valant typiquement 1 ms.

21. Justifier qu'avec les valeurs de Ω et τ , il est possible d'utiliser l'expression :

$$V_3(t) = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} V_{01} \sin(\Omega t) + \frac{V_M}{2}$$

comme solution approchée de l'équation (3) au-delà de 5 ms.

Les deux tensions d'entrée du multiplieur sont $V_3(t)$ et $V_1(t)$, sa tension de sortie est notée $V_4(t)$. $V_4(t) = K \cdot V_3(t) \cdot V_1(t)$ où K est une constante multiplicative.

On rappelle que $\sin^2(\Omega t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\Omega t)$.

22. Déterminer l'expression de $V_4(t)$ en fonction de $\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$, V_{01} , V_M , Ω et K , puis montrer que le spectre de $V_4(t)$ correspond à celui de la figure 8. On précisera la valeur des coefficients A, B et C en fonction de C_1 , C_2 , V_{01} , V_M et K .

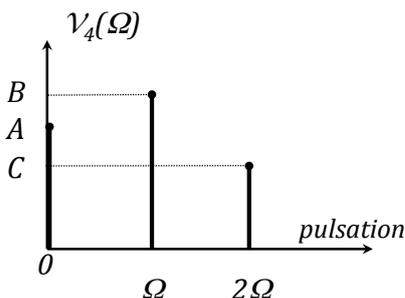


Figure 8 : $V_4(\Omega)$: décomposition harmonique de $V_4(t)$ signal de sortie du multiplieur.

23. Il est nécessaire d'amplifier la tension $V_4(t)$ avant le dernier étage de filtrage. Proposer un montage simple à ALI (acronyme d'amplificateur linéaire intégré) permettant un gain de +20 dB, c'est-à-dire que $20 \cdot \log \left(\left| \frac{V_5}{V_4} \right| \right) = +20$. Quel est l'autre intérêt de ce montage vis-à-vis du dernier étage constitué du filtre RC ?

24. Calculer, en notation complexe, la fonction de transfert $\underline{H}(j\omega) = \frac{V_S}{V_5}$ du filtre RC en fonction C_f , R_f et Ω . Quelle est la nature de ce filtre ?

25. Pour une valeur de C_f de 10 nF, proposer une plage de valeurs de R_f , pour que $V_S(t)$ suive les variations temporelles de $x(t)$ bien plus petites que T .

26. Comment s'appelle la technique utilisée dans le montage de la figure 6 ?

27. Montrer finalement que l'expression de $V_S(t)$ peut se mettre sous la forme :

$$V_S(t) = \beta (V_M)^2 \left[\frac{1}{4} + \alpha a_e(t) \right]$$

où β désigne une constante de proportionnalité qui ne sera pas déterminée. Préciser l'expression de α en fonction de d et ω_0 . Le montage complet de la figure 6 permet-il la mesure d'une accélération ?

Résolution de problème : déclenchement d'un airbag

Le coussin gonflable frontal conducteur d'un véhicule automobile ne doit se déclencher qu'en cas de choc, mais pas en cas de freinage d'urgence. Un véhicule de masse 1400 kg lancé à 130 km.h⁻¹ a besoin d'une distance minimale de 70 m pour s'arrêter. **L'annexe 3** représente quelques images d'un film de la collision contre un mur d'un véhicule lancé à 56 km.h⁻¹ dans lequel le coussin de protection se gonfle pour protéger le conducteur.

28. Les vidéos du choc frontal du véhicule peuvent-elles être réalisées avec une caméra ordinaire prenant entre 25 et 100 images par seconde ?

29. Où est-il judicieux de placer les accéléromètres permettant de détecter un choc frontal ?

30. Comparer les valeurs des décélérations lors d'un freinage d'urgence et d'une collision. En déduire un critère possible de déclenchement du coussin gonflable.

D. Utilisation d'un accéléromètre MEMS

Une séance expérimentale conduite dans le cadre de l'enseignement de spécialité de physique-chimie de la classe de terminale de la voie générale est consacrée à la détermination d'accélération en utilisant un microcontrôleur. La première partie de l'énoncé de cette activité destinée aux élèves et un extrait du programme sont proposés en **annexe 4**.

Quand le capteur est horizontal, l'accélération selon X ou Y est nulle, il apparaît en moyenne sur l'écran : $A_X = 341$; $A_Y = 342$ et $A_Z = 414$.

En réalité, sur 883 mesures de A_Y , on obtient la distribution indiquée dans le tableau ci-après.

Valeur A_y mesurée	341	342	343
Nombre d'occurrences	33	836	14

31. (QP) Après avoir réalisé un traitement statistique des mesures, comment un élève doit-il écrire correctement la mesure de A_Y ? Quelle réponse peut-il donner à la première question de l'activité ?

La sensibilité d'un capteur est définie comme la valeur de la variation de la grandeur de sortie par rapport à celle de la variation de la grandeur d'entrée. Le professeur souhaite faire réfléchir les élèves à cette notion en changeant la question 3. Il propose un protocole expérimental pour mesurer la sensibilité du capteur d'accélération (exprimée en V/g).

32. (QP) Écrire ce protocole expérimental concis à donner aux élèves. Appliquer le protocole aux mesures fournies pour déterminer la sensibilité du capteur étudié. Préciser les différences pédagogiques opérées lors de ce changement de question.

33. (QP) Donner deux intérêts pédagogiques ou didactiques à l'utilisation d'un microcontrôleur en classe. Donner aussi deux points de vigilance.

34. (QP) Le document élève utilise les termes d'accélération « statique » et d'accélération « dynamique ». Expliquer la difficulté didactique engendrée par ces appellations. Comment pourriez-vous lever cette ambiguïté à l'aide d'un argument scientifique ?

II. Détecteur hyperspectral MOEMS

Une image en couleur classique résulte de la décomposition de la lumière parvenant sur chaque pixel sur une base de trois bandes spectrales correspondant aux trois couleurs primaires (rouge, vert, bleu ou RGB). Une image hyperspectrale présente une décomposition spectrale pour chaque pixel sur une base d'une centaine de bandes spectrales et peut s'étendre dans l'infrarouge. Ce type d'image permet de nouveaux contrastes spécifiques de la constitution chimique des matériaux visualisés.

Cette technique repose sur une spectroscopie où le capteur est précédé d'une matrice de filtres. On étudiera ici des filtres interférométriques de type Fabry-Pérot. Leur épaisseur variable correspond au filtrage d'une bande spectrale fine autour d'une longueur d'onde précise. Les figures 9(a) et (b) illustrent ce principe pour quatre bandes spectrales.

Au vu des dimensions impliquées, il s'agit donc du champ d'application des MEMS, ou plus précisément de MOEMS pour *micro optical electromechanics system*. La photographie de la figure 10 montre le détail d'un micro Fabry-Pérot.

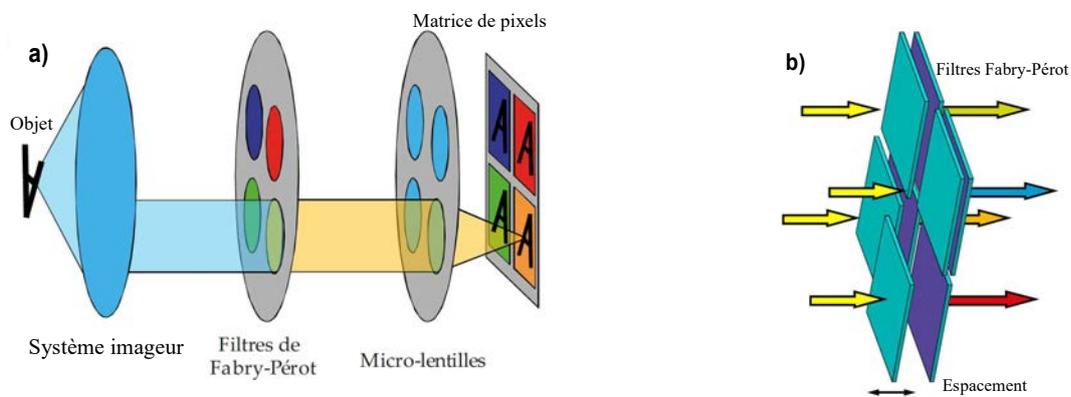


Figure 9 : principe du filtrage par Fabry-Pérot pixel par pixel. En a) le système utilise autant de filtres que de bandes spectrales à acquérir (ici seulement 4). En b) des filtres où les espacements différents entre les deux miroirs du Fabry-Pérot permettent de laisser passer les différentes bandes spectrales voulues. D'après thèse H. Bertin, 2013, Paris XI.

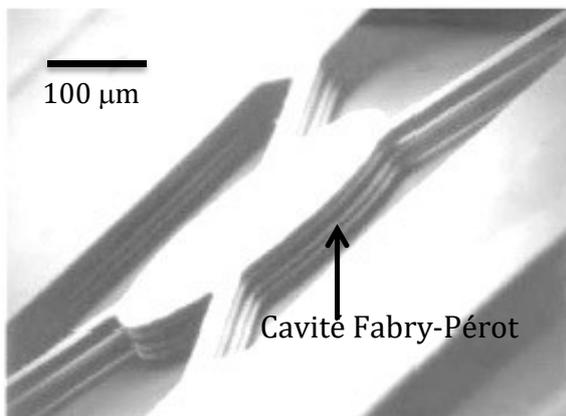


Figure 10 : image en microscopie électronique d'un micro Fabry-Pérot MOEMS fonctionnant dans l'infrarouge vers 1,5 µm. Les miroirs sont des multicouches (empilement air/phosphure d'indium (InP)). D'après P. Pondavalli et al., *Sensors and Actuators A : Physical*, 94 (2001), 134– 136.

En s'appuyant sur l'exemple du tri des déchets plastiques, cette partie débute par l'étude d'un document (A) permettant d'établir le cahier des charges du Fabry-Pérot nécessaire à l'imagerie hyperspectrale. La modélisation du filtre et son dimensionnement sont étudiés en B. Une partie du traitement d'image utilisé dans le tri est étudiée en langage Python dans la partie C.

A. Imagerie hyperspectrale pour le tri des déchets plastiques

La figure 11 illustre le tri optique de bouteilles plastiques par imagerie hyperspectrale. Dans l'image du bas de la figure, chaque matériau est associé à une fausse couleur qui permet de le distinguer des autres. Un traitement d'image identifie ensuite le type de matière plastique qui compose la bouteille pour automatiser le tri.

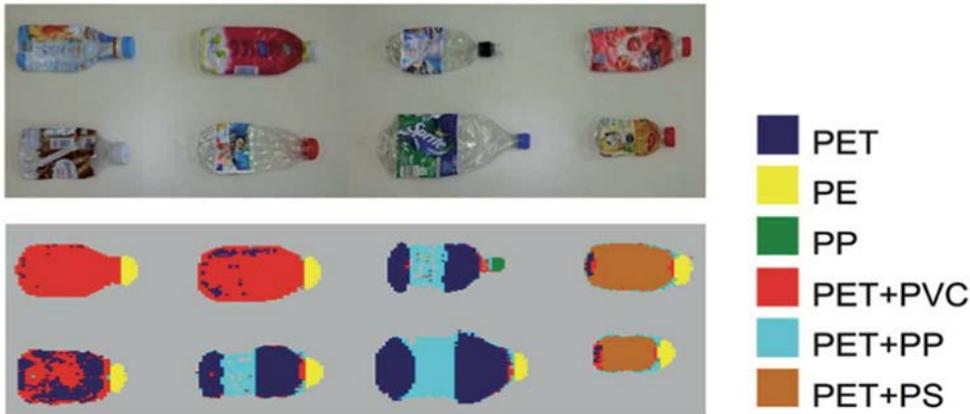


Figure 11 : imagerie hyperspectrale proche infra rouge KUSTA1.7 MSI de LLA instruments. En haut, image RGB, en bas, image hyperspectrale infrarouge traduite en fausses couleurs. Document LLA.

PET : polyéthylène téréphtalate, PE : polyéthylène, PP : polypropylène, PVC : polychlorure de vinyle, PS : polystyrène.

La figure 12, représentent les réflectances spectrales $R(\lambda)$ du PVC et du PET ; $R(\lambda) = \frac{I_{\text{réfléchié}}(\lambda)}{I_{\text{incidente}}(\lambda)}$.

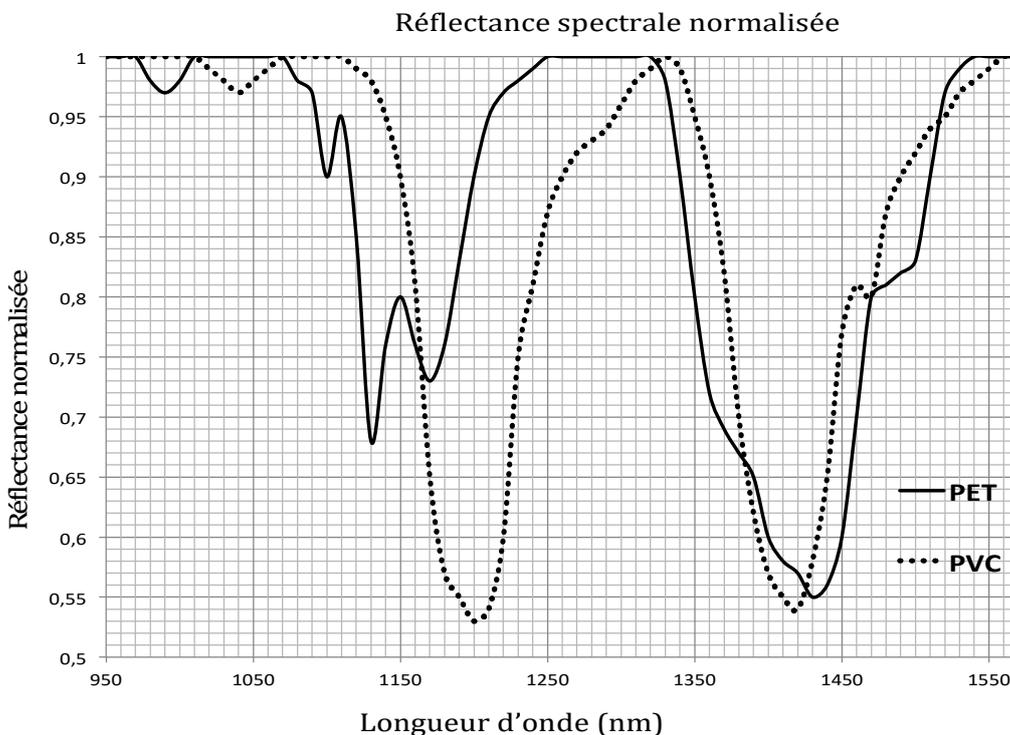


Figure 12 : réflectances spectrales $R(\lambda)$ normalisées (le maximum vaut 1) du PVC et du PET. D'après S.P.Garaba Remote Sensing of Environment, 205, (2018), 224-235.

35. Pour faciliter le tri optique des déchets de la figure 11, estimer, en utilisant la figure 12, une plage spectrale de fonctionnement $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ de la caméra hyperspectrale permettant de distinguer le PET du PVC. La résolution spectrale $\delta\lambda$ est définie comme la largeur de l'intervalle séparant deux points adjacents du spectre. Proposer une valeur de $\delta\lambda$ suffisante pour discerner ces deux matériaux avec la caméra.

Après avoir abordé expérimentalement la réfraction en classe de seconde générale et technologique, un professeur propose l'évaluation formative de l'**annexe 5**.

36. (QP) Quels sont les objectifs pédagogiques du professeur pour chaque partie ?

On dispose d'une copie d'élève (**Document réponse à rendre avec la copie**).

37. (QP) Corriger la copie et noter les conseils qu'il faudrait formuler pour faire progresser l'élève sur le **Document-réponse, à rendre avec la copie**.

38. (QP) La troisième partie de l'activité intitulée « Réponse à la problématique » n'a pas été réussie par les élèves. Effectuer une explication critique de la formulation de cette question, en lien avec les questions précédentes et les schémas indiqués dans l'énoncé. Proposer une modification dans l'énoncé ou une question supplémentaire pour lever la(les) difficulté(s) constatée(s).

B. Interféromètre de Fabry-Pérot

Un interféromètre de Fabry-Pérot est représenté sur la figure 13, il est constitué de deux lames identiques, planes, parallèles, distantes de e , partiellement réfléchissantes et d'épaisseur négligeable. L'espace entre les deux lames, rempli d'air, constitue une cavité Fabry-Pérot.

Un rayon lumineux associé à une vibration monochromatique de longueur d'onde λ , de fréquence ν , arrive en un point A. Cette vibration est notée sous forme complexe : $\underline{s}(A, t) = s_0 e^{j2\pi\nu t}$, s_0 correspond à son amplitude et son intensité vaut $I(A) = I_0 = \langle s(A, t)^2 \rangle = \frac{1}{2} \underline{s}(A, t) \underline{s}^*(A, t)$ où \underline{s}^* désigne le nombre complexe conjugué de \underline{s} .

On définit un coefficient de réflexion en amplitude r identique pour chaque point des lames comme le rapport de l'amplitude de la vibration réfléchie \underline{s}_r sur celle de l'onde incidente \underline{s}_i :

$$r = \frac{\underline{s}_r}{\underline{s}_i}$$

De même, un coefficient de transmission en amplitude est défini par $t = \frac{\underline{s}_t}{\underline{s}_i}$, où \underline{s}_t correspond à l'amplitude complexe de l'onde transmise par la lame.

Les coefficients sont réels et possèdent les propriétés suivantes : $0 < r < 1$, $0 < t < 1$ et $r^2 + t^2 = 1$.

On note $r^2 = R$ et $t^2 = T$.

Le rayon incident arrive sous l'angle d'incidence i sur la première lame au point A, cet angle i est fixé par un dispositif en amont pour optimiser le filtrage et n'est pas étudié ici.

Après des réflexions multiples, plusieurs rayons émergent du dispositif ; les trois premiers, notés 1, 2, 3, sont représentés sur la figure 13.

Tous les rayons 1, 2, 3, ..., N ($N \rightarrow \infty$) émergents du Fabry Pérot sont parallèles entre eux, puis ils traversent une lentille convergente L et interfèrent au point M.

Considérons le point B situé juste en sortie de l'interféromètre. L'onde se propage entre A et B et la vibration en B s'écrit sous la forme : $\underline{s}(B, t) = s_0 T e^{-j\varphi_0} e^{j2\pi\nu t} = \underline{s}_B e^{j2\pi\nu t}$ où \underline{s}_B est l'amplitude complexe en B et $\varphi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} [AB]$, où $[AB]$ désigne la longueur du chemin optique entre A et B. L'indice de l'air est égal à 1. H désigne le projeté orthogonal de D sur le rayon 1.

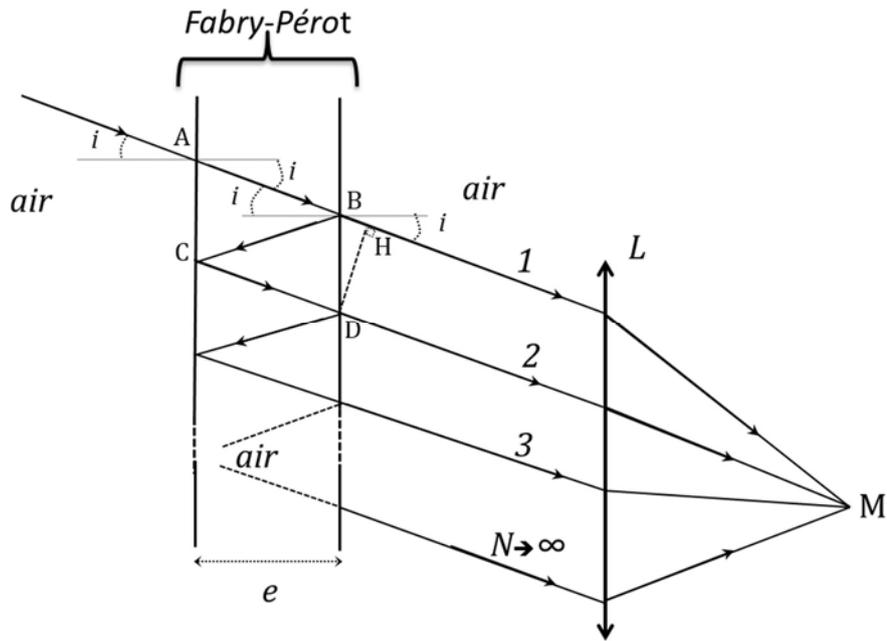


Figure 13 : trajet des rayons lumineux à travers l'interféromètre de Fabry-Pérot, seuls les premiers rayons sont représentés.

39. Calculer la longueur du chemin [BCD] en fonction e et i . Après avoir calculé la longueur BD, en déduire la longueur du chemin [BH] en fonction de e et i .
40. Exprimer la différence de chemin optique en M entre les rayons 1 et 2, en fonction des chemins [BCDM] et [BHM]. Après avoir justifié que les chemins optiques [HM] et [DM] sont égaux, montrer que le déphasage $\Delta\phi$ entre les rayons 2 et 1 en M s'écrit $\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} e \cdot \cos(i)$.
41. Exprimer l'amplitude complexe $\underline{s}_1(M)$ de la vibration associée au rayon 1 en M en fonction de s_0, T, φ_0 et $\frac{2\pi}{\lambda}$ [BHM].
42. Exprimer l'amplitude complexe $\underline{s}_2(M)$ de la vibration associée au rayon 2 en M en fonction de $s_0, T, R, \Delta\phi, \varphi_0$ et $\frac{2\pi}{\lambda}$ [BHM] puis en fonction de $\underline{s}_1(M), R$ et $\Delta\phi$.
On rappelle que la somme des termes d'une série géométrique de raison \underline{q} vaut : $\sum_{k=0}^{\infty} \underline{q}^k = \frac{1}{1-\underline{q}}$ avec $|\underline{q}| < 1$.
43. Déterminer l'expression de l'amplitude complexe en sortie $\underline{s}_{tot}(M)$ résultante de l'interférence d'une infinité d'ondes émergentes de l'interféromètre en M.
44. En déduire l'expression de l'intensité correspondante I_{tot} en fonction de $I_0, R, \Delta\phi$.

Il est possible d'écrire la fonction de transmittance $\Gamma(i, \lambda) = \frac{I_{tot}}{I_0}$ de l'interféromètre sous la forme :

$$\Gamma(i, \lambda) = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} e \cdot \cos i\right)}$$

L'annexe 6 représente le tracé de $\Gamma(i, \lambda)$ pour $450 < \lambda < 1900$ nm pour une valeur de $e \cdot \cos(i)$ de $1,0 \mu\text{m}$ et différentes valeurs de R .

45. Déterminer les positions des maxima de $\Gamma(i, \lambda)$ notés $\lambda_{\max,p}$ en fonction de e , i , et un entier p . Calculer la valeur de $\Gamma(i, \lambda_{\max,p})$. Vérifier la cohérence de votre réponse avec l'annexe 6 (A).
46. Justifier l'augmentation du nombre de maxima dans la bande spectrale étudiée lorsque l'épaisseur e de la cavité augmente.

On définit la largeur à mi-hauteur $\Delta\lambda$ de la courbe centrée autour d'un maximum $\lambda_{\max,p}$ par $\Gamma\left(i, \lambda_{\max,p} \pm \frac{\Delta\lambda}{2}\right) = \frac{\Gamma(i, \lambda_{\max,p})}{2}$.

On remarque que la largeur à mi-hauteur des pics de transmission diminue avec l'augmentation de R . Dans l'interféromètre accordable étudié, l'espacement entre les lames est contrôlé par des cales piézoélectriques et permet de modifier la valeur de $e \cdot \cos(i)$. Il est ainsi possible d'obtenir un balayage fin de la plage spectrale étudiée pour chaque pixel de l'image.

47. Proposer un intervalle de valeurs de $e \cdot \cos(i)$ pour que la fonction transmittance $\Gamma(i, \lambda)$ possède un maximum situé entre 1,00 et 1,30 μm . Quel élément d'optique est-il possible d'ajouter au dispositif pour que le capteur succédant à l'interféromètre détecte uniquement un rayonnement infra-rouge ?

48. À partir de l'annexe 6, quelle valeur de R serait compatible avec une valeur typique de $\Delta\lambda$ de l'ordre de 10 nm ? Quel inconvénient est associé à une valeur de R trop proche de l'unité ?

C. Traitement d'image en langage Python

La figure 14 présente l'image des bouteilles à trier. L'intensité détectée est représentée en nuance de gris, les points d'intensité maximale sont représentés en blanc et les moins intenses en noir. La valeur de l'intensité de certains pixels est précisée à l'extérieur de l'image.

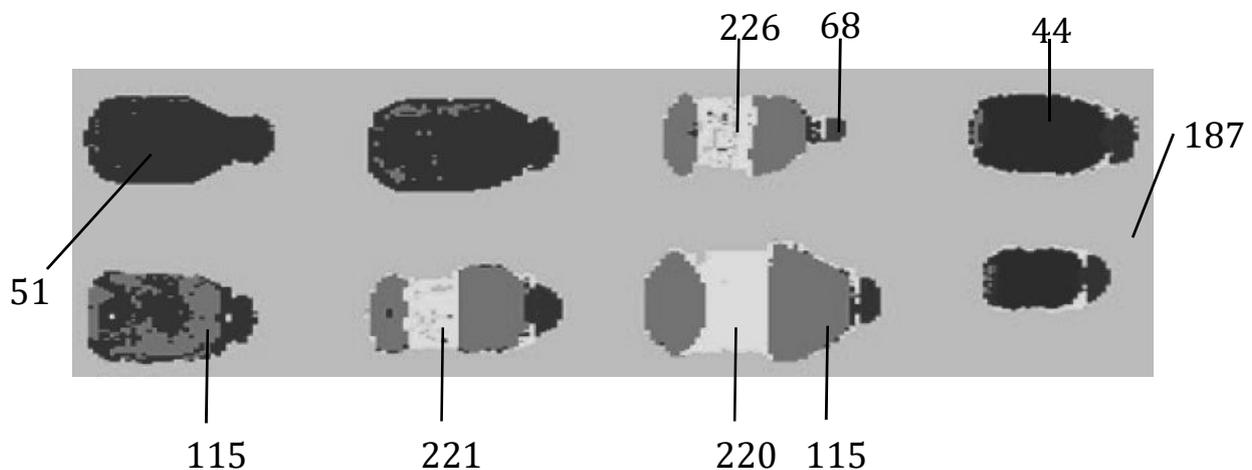


Figure 14 : image en nuances de gris. Les valeurs numériques correspondent à l'intensité des pixels désignés dans l'image. D'après document LLA.

Il est important pour le diagnostic d'isoler les bouteilles du fond de l'image. Pour cela, un code rédigé sous Python à compléter est proposé ci-dessous pour traiter le fichier 'bouteilles.png'.

Un pixel est repéré dans l'image grâce à deux indices : i et j ; ainsi `img[3,4]` correspond à l'intensité du 3^{ème} pixel sur la droite et 4^{ème} en bas en partant du coin supérieur gauche de l'image 'bouteilles.png' lue sous le nom `img`.

Le programme doit permettre d'observer les bouteilles sur un fond sombre et d'avoir un contraste maximal.

Script Python (le numéro de la ligne est indiqué entre parenthèses)

```
import numpy as np                (1)
import matplotlib.pyplot as plt   (2)
import matplotlib.image as mpimg  (3)

img=mpimg.imread('bouteilles.png') (4)
plt.imshow(img)                   (5)
plt.show()                        (6)

l,c=np.shape(img)                 (7)
for i in range (0,l) :            (8)
    for j in range (0,c) :        (9)
        if ..... :              (10)
            img[i,j]=0           (11)
        else :                   (12)
            img[i,j]=....        (13)

plt.imshow(img)                  (14)
plt.show()                       (15)
plt.close()                      (16)
```

Note : `.imread` permet de lire un fichier contenant une image, `.imshow` permet de la visualiser, `.shape` extrait le nombre de pixel verticaux puis horizontaux.

49. Il apparaît que sur n'importe quelle image l'intensité d'un pixel ne dépasse pas la valeur de 255. Quel renseignement peut-on en tirer concernant le convertisseur analogique numérique utilisé pour coder l'intensité ?
50. À partir de `l` et `c` définis dans le script, quelle taille occupe en mémoire cette image si `l = 212` et `c = 741` ?
51. Pourquoi deux boucles « for » sont présentes aux lignes (8) et (9) ? Que signifient les grandeurs (0,l) entre parenthèses ? Y-a-t-il une raison d'écrire ces boucles avec une indentation (ligne (8) plus à gauche que la ligne (9)) ?
52. On souhaite faire apparaître le fond de l'image en noir et les bouteilles en blanc. Compléter pour cela la ligne (10).
53. Pour obtenir une image en noir et blanc sans nuance de gris, compléter alors la valeur manquante à la ligne (13).
54. Dessiner l'allure de l'image associée au fichier "img" à la fin du traitement d'image.

III. Viscosimètre MEMS

Les MEMS trouvent naturellement leur place en contrôle et production en chimie. Grâce aux faibles quantités de matière impliquées et à la polyvalence des MEMS, il est possible de coupler des écoulements à des mesures électriques. En médecine, il est important de connaître la viscosité du sang pour adapter le dosage de certains traitements anticoagulants. Le MEMS permet ici une analyse à partir d'une simple goutte de quelques microlitres.

Le principe d'un viscosimètre MEMS utilisant un microcanal, est étudié dans les paragraphes A et B. Le modèle de l'écoulement utilisé dans ces parties est réinvesti dans une séquence pédagogique pour la classe de terminale sciences et technologie de laboratoire – sciences physiques et chimiques en laboratoire (STL-SPCL) dans la partie C.

Un modèle de viscosimètre commercial est représenté sur la figure 15.

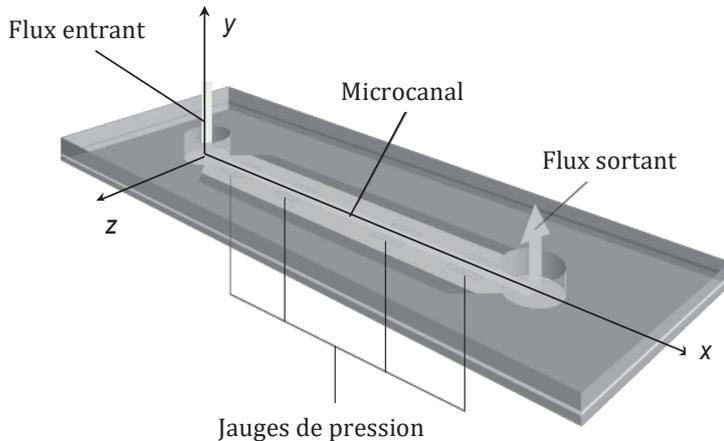


Figure 15 : viscosimètre microfluidique RheoSense de VROC. Schéma VROC.

Un fluide pouvant être considéré comme un milieu continu s'écoule dans un microcanal de longueur l_x dont la section est modélisée par une géométrie circulaire de diamètre $a = 100 \mu\text{m}$ ($a \ll l_x$) pour simplifier l'étude.

A. Équation de Navier-Stokes

L'équation de Navier-Stokes pour un fluide incompressible newtonien s'écrit sous la forme :

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}})\vec{v} = \vec{f}_v - \overrightarrow{\text{grad}}P + \eta \Delta \vec{v} \quad (4)$$

où \vec{v} désigne la vitesse en un point quelconque M de l'écoulement au temps t , ρ la masse volumique du fluide, \vec{f}_v la résultante des forces volumiques s'appliquant en M sur le fluide, P la pression et η le coefficient de viscosité dynamique du fluide.

En raison des dimensions du système et de son orientation dans le référentiel d'étude, on suppose l'effet de \vec{f}_v négligeable devant toutes les autres forces.

55. Dans le microcanal, exprimer le rapport χ des ordres de grandeur de la norme de $\rho(\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}})\vec{v}$ sur celle de $\eta \Delta \vec{v}$ en fonction de ρ , a , η et v . v désigne l'ordre de grandeur de $|\vec{v}|$. Sous quel nom χ est-il habituellement désigné ? Pour des vitesses de l'ordre de $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, estimer numériquement χ . Interpréter cette valeur en terme d'importance des effets convectifs par rapport aux effets diffusifs. Que peut-on en déduire sur la nature de l'écoulement ?

56. En déduire que le champ de vitesse dans le microcanal satisfait à l'équation (5) en régime stationnaire :

$$\eta \Delta \vec{v} = \overrightarrow{\text{grad}}P \quad (5)$$

B. Écoulement de Poiseuille

On applique une différence de pression de $\Delta P = P(0) - P(l_x) > 0$ entre l'entrée et la sortie du microcanal. On adopte un système de coordonnées cylindriques d'axe Ox : r est la distance à l'axe dans le plan Oyz. La vitesse s'écrit de manière générale : $\vec{v} = v_x \cdot \vec{u}_x + v_r \cdot \vec{u}_r + v_\theta \cdot \vec{u}_\theta$, où \vec{u}_r , \vec{u}_θ et \vec{u}_x désignent les vecteurs unitaires dans le repère cylindrique. Dans le cas le plus général, chaque composante dépend des trois variables, soit : $v_x(r, \theta, x)$, $v_r(r, \theta, x)$ et $v_\theta(r, \theta, x)$.

57. Montrer que la vitesse est orientée suivant x et dépend uniquement de la variable r , on la note $v_x(r)$.

58. En supposant la chute de pression ΔP uniforme sur la longueur l_x , donner une expression de $\overrightarrow{\text{grad}P}$ en fonction de ΔP , l_x et \vec{u}_x .

59. Que vaut v_x en $r = \frac{a}{2}$?

60. Calculer $v_x(r)$ à partir de l'équation (5). On rappelle que l'expression de la composante suivant x de l'opérateur Laplacien vectoriel est $(\Delta \vec{v}) \cdot \vec{u}_x = \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_x}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right)$

Le débit volumique Q_v de l'écoulement à travers le canal est défini par $Q_v = \int_0^{a/2} v_x(r) 2\pi r dr$.

61. Montrer que Q_v s'écrit sous la forme : $Q_v = \frac{\pi \Delta P}{128 \eta l_x} a^4$.

62. En utilisant le document de la figure 16, et le schéma du viscosimètre de la figure 15, calculer la valeur de la viscosité dynamique du fluide en écoulement dans le canal si le débit mesuré est $Q_v = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

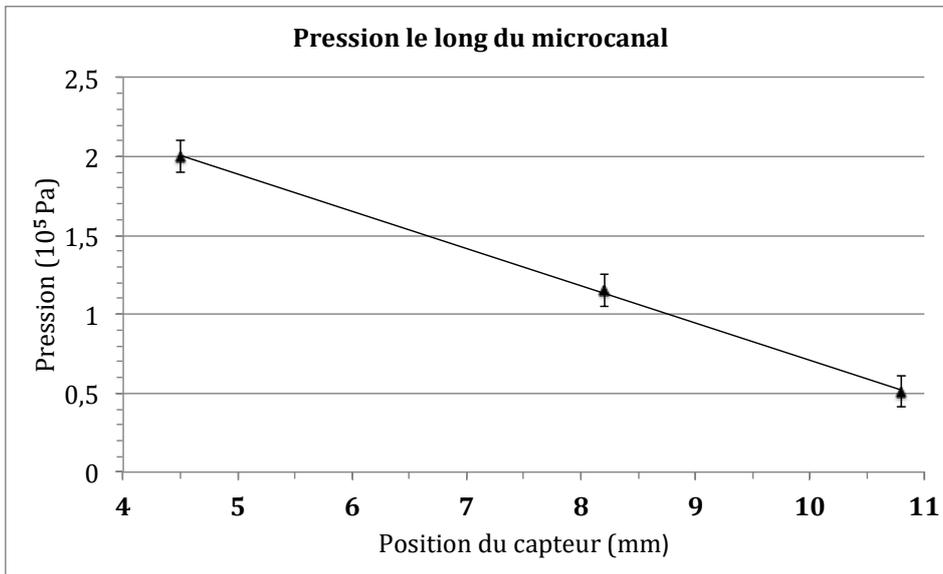


Figure 16 : mesure de pression en fonction de la position de la jauge sur le canal. Données VROC.

C. Transport des flux de matière en STL-SPCL

Un professeur de terminale sciences et technologie de laboratoire – sciences physiques et chimiques en laboratoire (STL-SPCL) propose l'activité de **l'annexe 7**.

On suppose que l'eau est en écoulement incompressible et parfait.

- 63. (QP)** Définir les deux qualificatifs : incompressible et parfait. Indiquer en justifiant la réponse si le modèle « écoulement incompressible et parfait » est pertinent dans le cas du réseau d'irrigation décrit dans le document de **l'annexe 7**.
- 64. (QP)** Dans l'expérience proposée par le professeur, expliquer la présence de la pompe et du tuyau de trop plein et justifier l'expression du débit « issue du théorème de Bernoulli » rappelée dans la question 3.
- 65. (QP)** Le professeur souhaite ajouter à la suite de cette activité une question supplémentaire pour exploiter le théorème de Bernoulli dans la situation où il y a une pompe. Rédiger une question qu'il serait possible de poser et indiquer la réponse attendue.

_____ *FIN DE L'ÉPREUVE* _____

Annexes

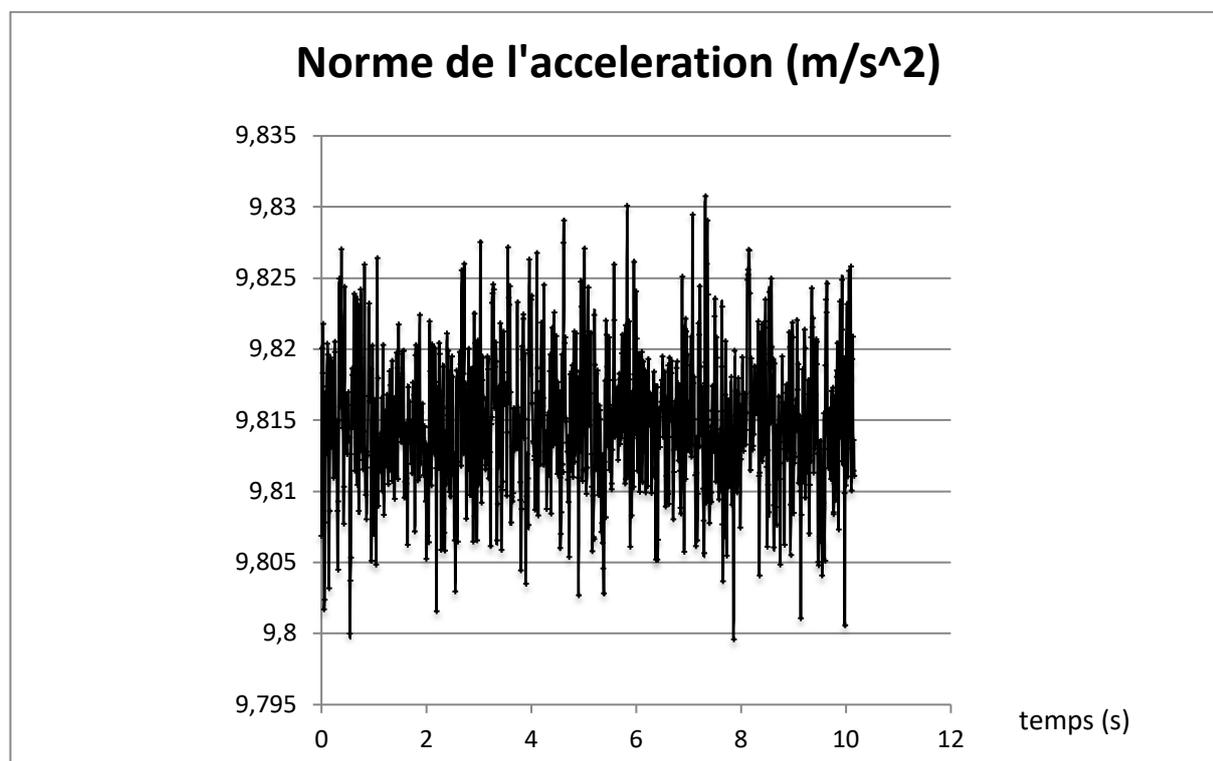
Annexe 1 : séance expérimentale en classe de troisième

Début du document distribué aux élèves

Expérience 1 : en utilisant l'application phyphox® sur un Smartphone, il est possible de mesurer l'intensité d'accélération de pesanteur, g . Le protocole est le suivant :

- dans l'application phyphox®, sélectionner capteurs/accélération avec g ;
- tenir verticalement le smartphone et appuyer sur lecture ;
- après quelques secondes appuyer sur pause ;
- sélectionner « norme » et écrire la valeur indiquée par l'application en conservant un chiffre après la virgule ;
- effectuer une copie d'écran et une impression.

Copie d'écran de l'application phyphox® sur un smartphone élève



Expérience 2 : il est possible de retrouver cette valeur en mesurant à l'aide d'un dynamomètre le poids d'objets de masses connues.

Le protocole est le suivant :

- construire un tableau de mesures intégrant les masses et les poids des objets distribués ;
- mesurer le poids de chacun d'eux et compléter le tableau ;
- réaliser un graphique représentant le poids en fonction de la masse ;
- déterminer la valeur de « g » et la comparer avec celle fournie par le smartphone.

Valeurs de « g » obtenues avec des dynamomètres par les 13 groupes d'élèves de la classe :

9,7	9,8	9,8	9,7	9,9	9,8	9,8	9,7	9,8	9,7	9,9	9,6	9,8
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Annexe 2 : extrait du programme de physique-chimie du cycle 4

Compétences travaillées

Pratiquer des démarches scientifiques

- » Identifier des questions de nature scientifique.
- » Proposer une ou des hypothèses pour répondre à une question scientifique. Concevoir une expérience pour la ou les tester.
- » Mesurer des grandeurs physiques de manière directe ou indirecte.
- » Interpréter des résultats expérimentaux, en tirer des conclusions et les communiquer en argumentant.
- » Développer des modèles simples pour expliquer des faits d'observations et mettre en œuvre des démarches propres aux sciences.

Domaine du socle : 4

[...]

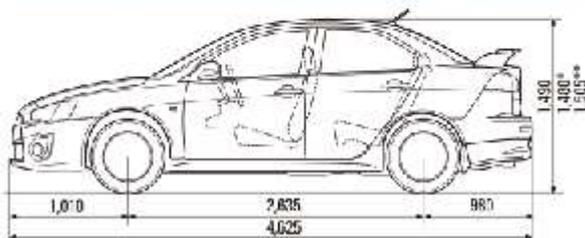
Thème : mouvement et interaction.

[...]

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
Modéliser une interaction par une force caractérisée par un point d'application, une direction, un sens et une valeur	
Identifier les interactions mises en jeu (de contact ou à distance) et les modéliser par des forces. Associer la notion d'interaction à la notion de force. Exploiter l'expression littérale scalaire de la loi de gravitation universelle, la loi étant fournie. » Action de contact et action à distance. » Force : point d'application, direction, sens et valeur. » Force de pesanteur et son expression $P=mg$.	L'étude mécanique d'un système peut être l'occasion d'utiliser les diagrammes objet-interaction. Expérimenter des situations d'équilibre statique (balance, ressort, force musculaire). Expérimenter la persistance du mouvement rectiligne uniforme en l'absence d'interaction (frottement). Expérimenter des actions produisant un mouvement (fusée, moteur à réaction). Pesanteur sur Terre et sur la Lune, différence entre poids et masse (unités). L'impesanteur n'est abordée que qualitativement.

Annexe 3 : quelques images extraites du film de la collision d'un véhicule contre un mur. Vues latérales droites et gauches
 (Source : EURO NCAP 2012 lancement à 56 km/h)





Dimensions Mitsubishi LANCER

Masse à vide : 1300 kg

Roues de rayon : 33 cm

Annexe 4 : séance expérimentale conduite dans le cadre de l'enseignement de spécialité de physique-chimie de la classe de terminale générale

Activité "élève"

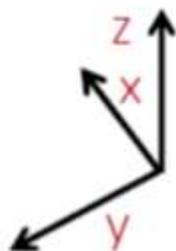
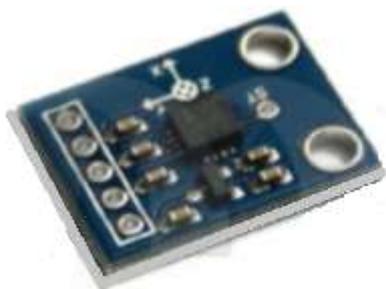
Bien que l'accélération s'exprime en m.s^{-2} , la documentation sur les capteurs d'accélération l'exprime en multiples de « g », où g correspond à l'intensité de la pesanteur (environ $9,8 \text{ m.s}^{-2}$ sur Terre).

Lors d'un changement de vitesse ou de direction, une accélération apparaît. Une voiture dont la vitesse passe progressivement et de manière continue de zéro à 100 km.h^{-1} fait subir à ses passagers une accélération de $0,25 g$, si elle roule en ligne droite. Une voiture qui effectue un virage (assimilé à un arc de cercle de 40 m de rayon) à vitesse constante (environ 80 km.h^{-1}) a une accélération supérieure, de l'ordre de 1 à $1,5 g$. Des accélérations supérieures à $50 g$ sont potentiellement mortelles.

Les accéléromètres sont des capteurs utilisés pour enregistrer des accélérations « statiques » (gravité) et « dynamiques » (choc, mouvement). Ils peuvent saisir des mouvements (manettes de jeu, airbag), mais aussi indiquer comment est orienté un objet par rapport à la Terre grâce à l'effet de gravité. Cela permet, par exemple, de passer automatiquement du mode portrait au mode paysage avec un smartphone.

Les premiers accéléromètres utilisant des MEMS datent de 1980 pour déclencher des airbags. C'est à la suite de la diminution forte des prix et à la miniaturisation des capteurs qu'ils ont pu progressivement être introduits dans les smartphones.

L'ADXL335 est un capteur d'accélération. Sa tension de sortie varie linéairement, approximativement de 0 V à $-3 g$ jusqu'à $3,3 \text{ V}$ à $+3 g$. Les données « constructeur » sont les suivantes :



Gamme : $\pm 3 g$
linéarité : $0,3 \%$
Sensibilité (minimum) : 300 mV/g
Sortie (environ) : $1,65 \text{ V}$ à $0 g$

Alimentation : 5 V
Consommation faible : $350 \mu\text{A}$

Le programme téléversé dans le microcontrôleur permet d'effectuer les mesures d'accélérations suivant les trois axes. Il indique un nombre entier entre 0 et 1024.

Réaliser une série de mesures lorsque le capteur est horizontal.

1. On rappelle que la sortie 1024 correspond à une tension de $5,0 \text{ V}$. Déterminer à partir des mesures la tension d'offset, c'est-à-dire la valeur de la tension délivrée par le module lorsque l'accélération est nulle. Comparer de manière argumentée avec la donnée "constructeur".
2. Quelle relation permet d'obtenir, à partir de la valeur affichée, la valeur de l'accélération directement en multiples de « g » ?
3. Définir un protocole expérimental accompagné d'un schéma pour déterminer l'angle d'inclinaison du capteur en utilisant le capteur fourni.

Extrait du programme de physique-chimie de la classe de terminale générale

BO spécial n° 8 du 25 juillet 2019

Mesure et incertitudes

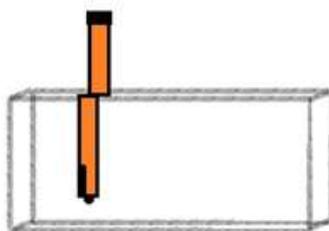
Les concepts de mesure et d'incertitude ont été introduits en classe de seconde. En complément du programme de la classe de première, celui de la classe terminale introduit la notion d'incertitude-type composée, ajoute une compétence numérique visant à illustrer une situation de mesure avec incertitudes composées et propose d'utiliser un critère quantitatif pour comparer, le cas échéant, le résultat de la mesure d'une grandeur à une valeur de référence.

L'objectif principal est d'exercer le discernement et l'esprit critique de l'élève sur les valeurs mesurées, calculées ou estimées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Variabilité de la mesure d'une grandeur physique.	Exploiter une série de mesures indépendantes d'une grandeur physique : histogramme, moyenne et écart-type. Discuter de l'influence de l'instrument de mesure et du protocole. Évaluer qualitativement la dispersion d'une série de mesures indépendantes. Capacité numérique : Représenter l'histogramme associé à une série de mesures à l'aide d'un tableur ou d'un langage de programmation.
Incertitude-type.	Définir qualitativement une incertitude-type. Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une approche statistique (évaluation de type A). Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une autre approche que statistique (évaluation de type B).
Incertitudes-types composées.	Évaluer, à l'aide d'une formule fournie, l'incertitude-type d'une grandeur s'exprimant en fonction d'autres grandeurs dont les incertitudes-types associées sont connues. Capacité numérique : Simuler, à l'aide d'un langage de programmation, un processus aléatoire illustrant la détermination de la valeur d'une grandeur avec incertitudes-types composées.
Écriture du résultat. Valeur de référence.	Écrire, avec un nombre adapté de chiffres significatifs, le résultat d'une mesure. Comparer, le cas échéant, le résultat d'une mesure m_{mes} à une valeur de référence m_{ref} en utilisant le quotient $ m_{mes} - m_{ref} / u(m)$ où $u(m)$ est l'incertitude-type associée au résultat.

Annexe 5 : étude de la réfraction en classe de seconde générale et technologique

Un stylo est posé derrière un pavé rectangulaire de verre. Sur la photographie ci-dessous réalisée de biais, on a l'impression de voir un stylo coupé et décalé. Le but de l'activité est d'expliquer cet effet optique surprenant.



A- Mesures préalables : lois de Snell-Descartes

Lors d'une activité expérimentale, un élève réalise l'étude de la réfraction en utilisant ce pavé de verre couché sur la table. Le faisceau de lumière provient du haut.

Les mesures des angles d'incidence (i_1) et de réfraction (i_2) sont réalisées en utilisant un rapporteur. Leurs valeurs et les sinus de ces angles sont indiqués dans le tableau ci-dessous.



i_1 (degré)	10	20	30	40	50	60	70	80
i_2 (degré)	9	13	22	25	32	35	38	45
$\sin(i_1)$	0,17	0,34	0,50	0,64	0,76	0,86	0,94	0,98
$\sin(i_2)$	0,16	0,22	0,37	0,42	0,53	0,57	0,62	0,71

A.1 Tracer sur la feuille de papier millimétrée fournie le graphe représentant $\sin(i_1)$ en fonction de $\sin(i_2)$

A.2 Écrire la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction.

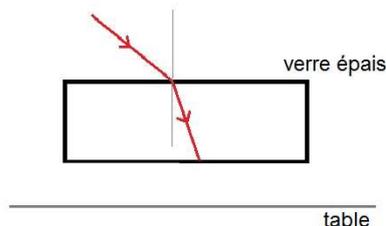
A.3 Comment peut-on déterminer le plus précisément possible la valeur de l'indice du verre utilisé en utilisant le graphe et sachant que l'indice de l'air est $n_1 = 1,00$?

A.4 Déterminer la valeur de cet indice.

B- Déplacement du pavé de verre

Le pavé de verre est déplacé vers le haut, comme l'indique le schéma suivant. Prolonger le trajet du rayon en sortie du verre.

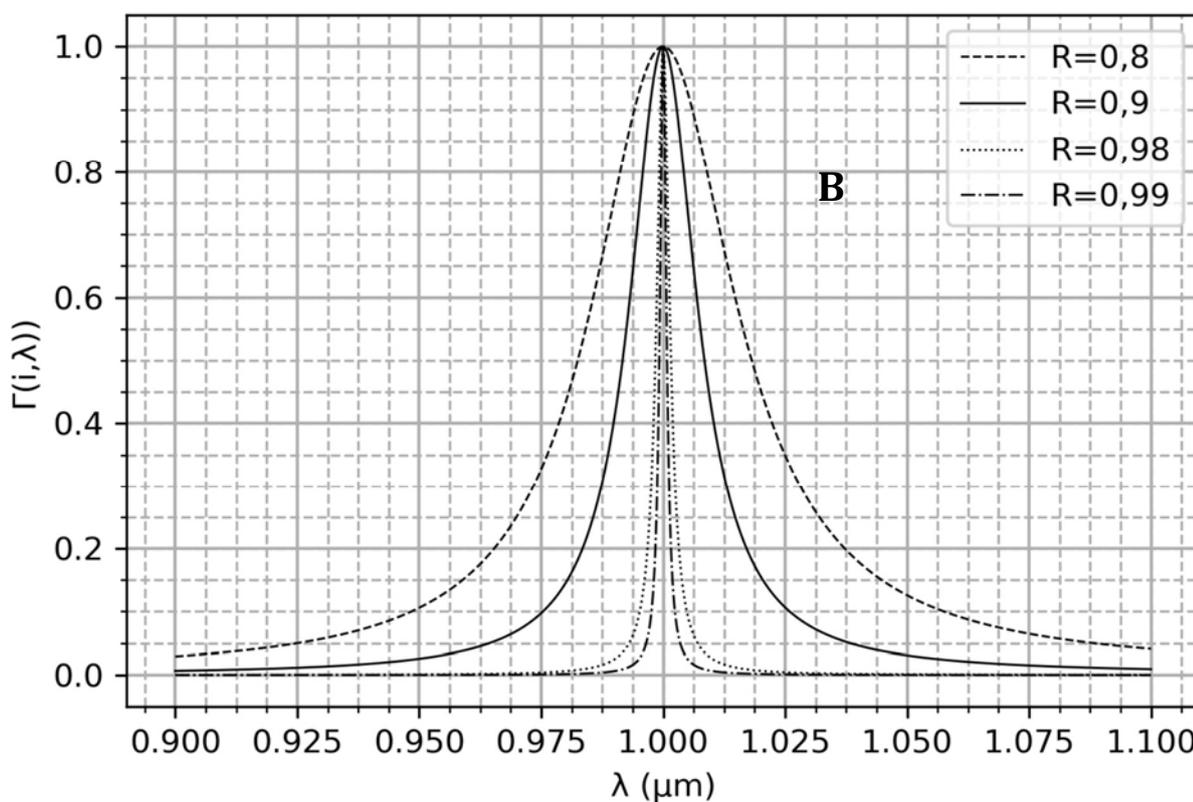
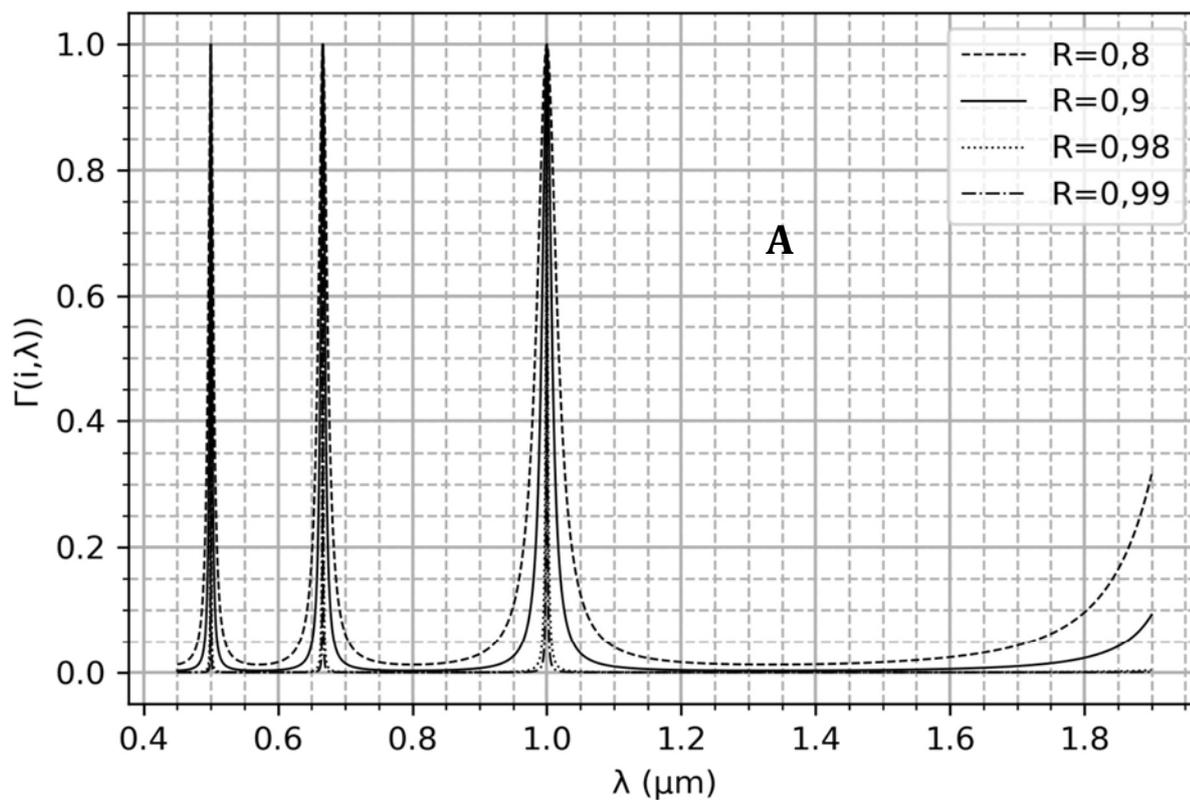
Expliquer brièvement votre démarche.



C- Réponse à la problématique

Expliquer en quelques lignes l'effet optique observé lorsqu'on place le stylo derrière le pavé de verre. On pourra s'aider d'un schéma si besoin, ainsi que des résultats obtenus dans les précédentes questions.

Annexe 6 : fonction de transmittance de l'interféromètre



Fonction de transmittance $\Gamma(i, \lambda)$ de l'interféromètre pour une valeur de $e \cdot \cos(i) = 1,0 \mu\text{m}$, avec des coefficients $R = [0,8 ; 0,9 ; 0,98 ; 0,99]$.

(**A**) pour $450 < \lambda < 1900 \text{ nm}$; (**B**) pour $900 < \lambda < 1100 \text{ nm}$.

Annexe 7 : activité expérimentale en STL-SPCL

Dimensionnement d'un réseau hydraulique d'irrigation dans un jardin

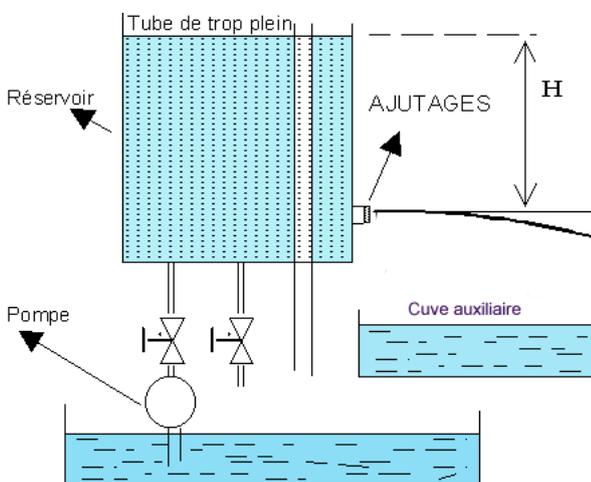
La connaissance du débit d'un circuit d'arrosage influence le choix du diamètre du tuyau à utiliser. L'eau peut être mise sous pression dans les tuyaux par gravité ou en utilisant une pompe. Un réducteur de pression ou à l'inverse un surpresseur peut être nécessaire pour réguler les débits. La connaissance de la pression en amont de l'installation n'est pas suffisante pour dimensionner correctement le système car des pertes de charges apparaissent dans le réseau. Elles peuvent être régulières, liées à la viscosité du fluide. Dans ce cas, pour un écoulement laminaire, elles obéissent à la relation de Poiseuille :

$$\Delta P = \frac{8L\eta Q_v}{\pi(a/2)^4}$$

Où η désigne la viscosité dynamique de l'eau. η est égale à environ $1,0 \cdot 10^{-3}$ Pa.s à température et pression ambiantes. L et a correspondent respectivement à la longueur et au diamètre intérieur du tuyau cylindrique. Q_v est le débit volumique.

Pour un bon fonctionnement du réseau, une perte de pression entre l'amont et l'aval ne doit pas excéder 20 % de la pression initiale.

1. Évaluer la variation de pression pour un tuyau linéaire de longueur $L = 20,0$ m et de diamètre $a = 2,0$ cm. La pression amont est mesurée à 2,5 bar et le débit volumique Q_v est de $42 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Conclure.
2. Un jardinier dispose d'une réserve d'eau dans une cuve provenant d'eaux pluviales. On se propose d'étudier le lien entre le débit amont et la hauteur d'eau du réservoir. Pour cela on effectue l'expérience suivante :



(Schéma : académie Nancy-Metz)

En utilisant une éprouvette et un chronomètre, déterminer la valeur du débit en fonction de la hauteur de liquide.

H	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
Q_v						

3. Proposer une méthode pour montrer que ces valeurs expérimentales sont compatibles avec l'expression issue du théorème de Bernoulli : $Q_{vth} = S \cdot \sqrt{2gH}$, où S représente la section de l'ouverture et g l'intensité de l'accélération de la pesanteur terrestre.

Extrait du programme du programme de sciences physiques et chimiques en laboratoire de terminale STL-SPCL

Notions et contenus	Capacités exigibles
Débit. Vitesse d'écoulement.	<ul style="list-style-type: none"> - Exprimer la relation entre débit massique et débit volumique. - Exprimer la relation entre le débit volumique d'un fluide et sa vitesse d'écoulement. - Exploiter la conservation du débit pour des écoulements permanents incompressibles.
Pression, force de pression. Le principe fondamental de la statique des fluides.	<ul style="list-style-type: none"> - Exploiter la relation entre la force de pression, la pression et la surface. - Utiliser le principe fondamental de la statique des fluides incompressibles. <p>Capacités expérimentales :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mesurer une pression. - Concevoir et mettre en œuvre un protocole pour estimer la hauteur de liquide dans un réservoir.
Circuits hydrauliques et théorème de Bernoulli	
Théorème de Bernoulli. Circuits hydrauliques. Pompe. Puissances utile (puissance hydraulique) et absorbée. Rendement.	<ul style="list-style-type: none"> - Exploiter le théorème de Bernoulli pour un fluide incompressible. - Expliquer l'effet Venturi et citer des applications. <ul style="list-style-type: none"> - Exploiter le théorème de Bernoulli avec pertes de charges. - Exploiter des documents pour étudier les pertes d'énergie dans un circuit hydraulique et mettre en évidence l'influence de quelques paramètres : vitesse d'écoulement, longueur et section de la canalisation, singularités. <ul style="list-style-type: none"> - Expliquer le rôle d'une pompe. - Exploiter le théorème de Bernoulli avec une pompe. - Définir et exploiter l'expression de la puissance utile d'une pompe. - Définir et évaluer le rendement d'une pompe, la puissance électrique absorbée étant fournie. <p>Capacités expérimentales :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mettre en œuvre un protocole permettant d'étudier l'influence d'au moins un paramètre sur les pertes d'énergie dans un écoulement.

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

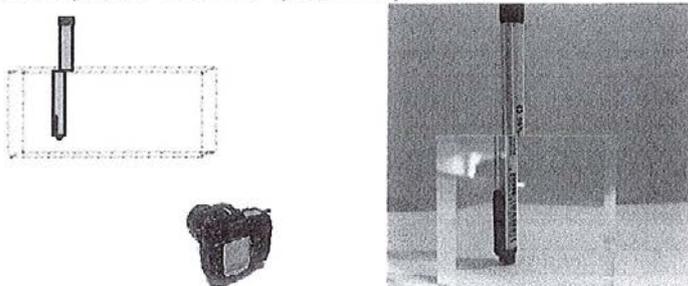
Document réponse à rendre avec la copie (QP37)

Copie d'élève : page 1

/ 20

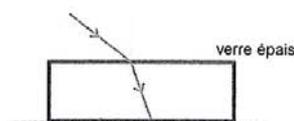
Toute réponse doit être rédigée correctement et justifiée.

Un stylo est posé derrière un pavé rectangulaire de verre. On place un appareil photo de biais, comme indiqué sur le schéma. Sur la photographie réalisée, on a l'impression de voir un stylo coupé et décalé. Le but de l'activité est d'expliquer cet effet optique surprenant.



A- Mesures préalables : Lois de Snell-Descartes

Lors d'une activité expérimentale, un élève réalise l'étude de la réfraction en utilisant ce pavé de verre. Le faisceau de lumière provient cette fois-ci du haut. Les mesures des angles d'incidence (i_1) et de réfraction (i_2) sont réalisées. Leurs valeurs et les sinus de ces angles sont indiqués dans le tableau ci-dessous :



i_1 (degré)	10	20	30	40	50	60	70	80
i_2 (degré)	9	13	22	25	32	35	38	45
$\sin(i_1)$	0,17	0,34	0,50	0,64	0,76	0,86	0,94	0,98
$\sin(i_2)$	0,16	0,22	0,37	0,42	0,53	0,57	0,62	0,71

- Tracer sur la feuille de papier millimétrée fournie en annexe 1 le graphe représentant $\sin(i_1)$ en fonction de $\sin(i_2)$.
- Ecrire la loi de Snell-Descartes relative aux angles de réfraction.

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$$

- Comment peut-on déterminer le plus précisément possible l'indice du verre utilisé en utilisant le graphe, sachant que l'indice de l'air est $n_1 = 1,00$?

$$y = ax \quad a \times x_A = a \times x_B \Leftrightarrow a = \frac{x_A}{y_A} = \frac{x_B}{y_B}$$

- Déterminer cet indice.

$$a = \frac{0,98 - 0,17}{0,71 - 0,16} = \frac{0,81}{0,55} \approx 1,47$$

B- Déplacement du pavé de verre

Le pavé de verre est déplacé vers le haut, comme l'indique le schéma en annexe 2. Prolonger le trajet du rayon en sortie du verre. Expliquer brièvement votre démarche.

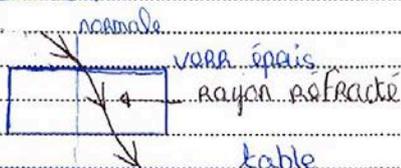
Le rayon en sortie est parallèle à l'incident car le rayon est réfracté lorsque il traverse le pavé mais pas quand il est dans le milieu de l'air.

C- Réponse à la problématique

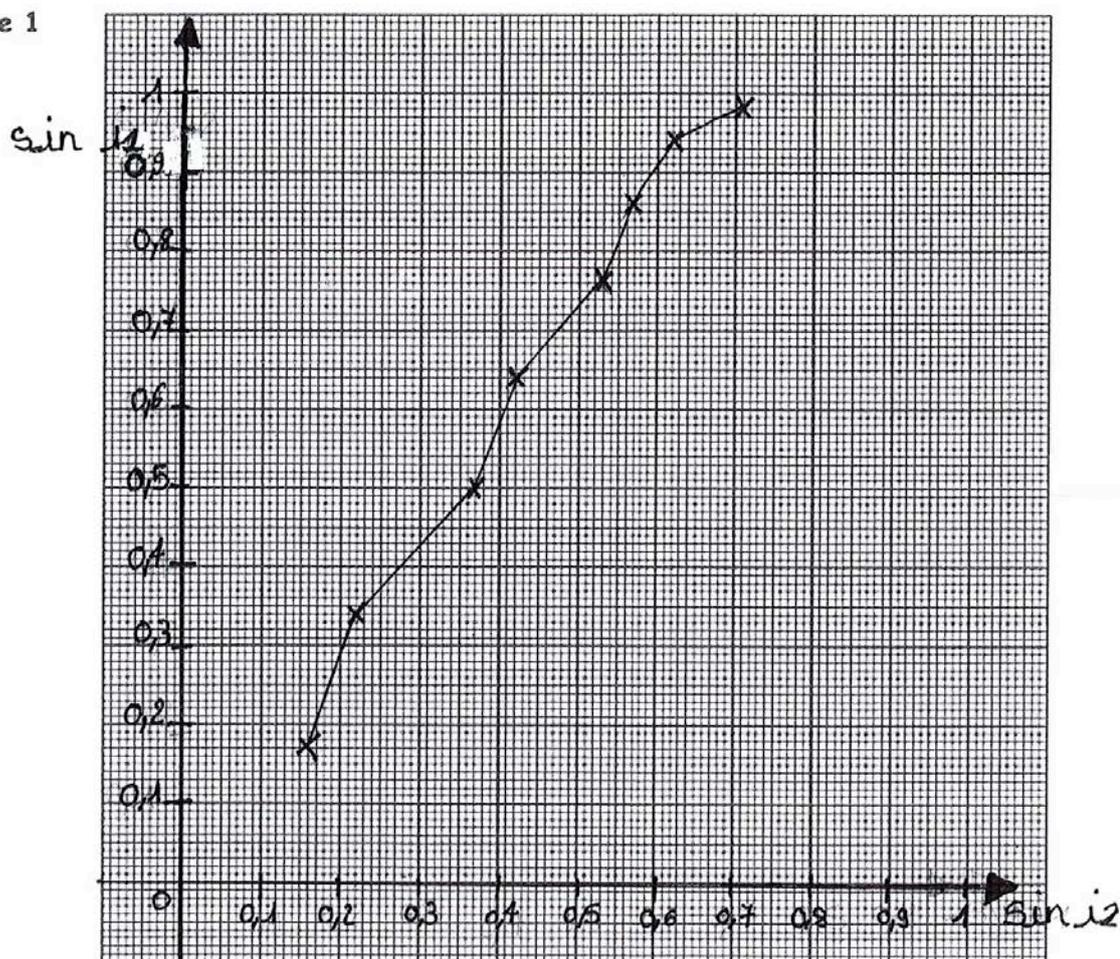
Document réponse à rendre avec la copie (QP37) Copie d'élève : page 2

Expliquer en quelques lignes l'effet optique observé lorsqu'on place le stylo derrière le pavé de verre.
On pourra s'aider d'un schéma si besoin, ainsi que des résultats obtenus dans les précédentes questions.

L'effet d'optique observé est dû au fait que le pavé est un milieu transparent et homogène. Le stylo et la lumière sont tous les deux réfractés à travers le pavé.



Annexe 1



Annexe 2

