



10PSI13

CONCOURS ARTS ET MÉTIERS ParisTech - ESTP - ARCHIMEDE**Épreuve de Physique - Chimie PSI****Durée 4 h**

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au chef de salle, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'usage de calculatrices est autorisé.

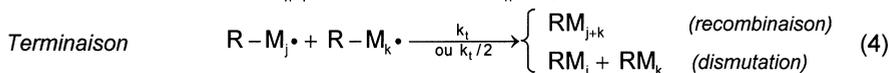
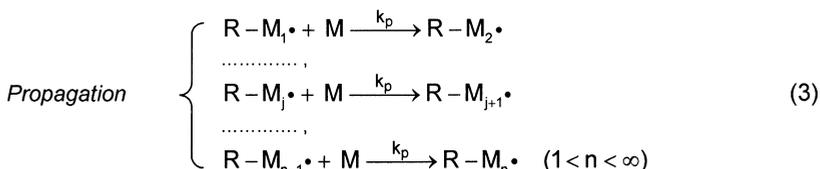
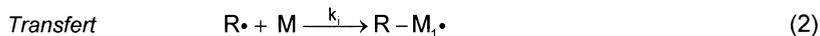
Ce problème illustre la **synthèse, la mise en forme et la caractérisation du polyméthacrylate de méthyle (PMMA)** et comporte trois volets indépendants : cinétique de polymérisation du PMMA (première partie), réalisation de plaques par injection de polymère fondu (seconde partie) et caractérisation optique du matériau élaboré (troisième partie).

Remarques préliminaires importantes : il est rappelé aux candidat(e)s que

- *les explications des phénomènes étudiés interviennent dans la notation au même titre que les développements analytiques et les applications numériques ; les résultats exprimés sans unité ne seront pas comptabilisés ;*
- *tout au long de l'énoncé, les paragraphes en italiques ont pour objet d'aider à la compréhension du problème mais ne donnent pas lieu à des questions ;*
- *tout résultat fourni dans l'énoncé peut être admis et utilisé par la suite, même s'il n'a pas été démontré par les candidat(e)s.*

Le polyméthacrylate de méthyle est plus connu sous le nom de plexiglas[®]. De par sa parfaite transparence et sa remarquable tenue au temps, il est principalement utilisé pour remplacer le verre : verres optiques organiques, vitres incassables, hublots d'avion, vitrines, lanternerie automobile, sanitaires, baignoires, ...

Le schéma réactionnel de la polymérisation radicalaire du PMMA comporte quatre étapes principales, décrites ci-dessous : (absence totale de ramification)



A est l'amorceur, M le monomère, les $R\bullet$ sont les radicaux générés par la décomposition de l'amorceur et les $R-M_j\bullet$ ($j = 1, 2, \dots, n$) sont les intermédiaires réactionnels formés lors de la croissance des chaînes de polymère (ils sont supposés avoir la même réactivité). Le facteur d'efficacité f de l'amorceur représente la fraction des radicaux $R\bullet$ qui servent réellement à amorcer la polymérisation. Les constantes de vitesses k_a , k_t , k_p et k_t sont relatives aux diverses réactions, toutes étant des actes élémentaires.

Dans le stade de terminaison, deux macro-radicaux, identiques ou différents, réagissent entre eux pour donner naissance à une ou plusieurs molécules de polymère, RM_j représentant un polymère à j motifs. La réaction de terminaison est, soit une recombinaison, soit une dismutation en fonction du type de monomère employé et de l'accessibilité des sites radicalaires ; dans cette phase, la constante de vitesse vaut k_t si $j \neq k$ et $k_t/2$ si $j = k$.

B1*a. Préciser le rôle de l'amorceur.

B1*b. Définir puis donner l'expression de la vitesse d'amorçage V_a .

La phase d'amorçage étant plus « difficile » que la phase de transfert, introduisons l'hypothèse de l'état quasi-stationnaire aux radicaux $R\bullet$.

B1*c. En quoi consiste cette hypothèse ? A quel savoir la doit-on ?

B1*d. Appliquer cette hypothèse aux radicaux $[R\bullet]$; en déduire la vitesse de transfert (ou d'initiation) V_i en fonction de f , k_a , et $[A]$. La comparer à la vitesse d'amorçage.

La vitesse globale de réaction ou vitesse de polymérisation V_p est la vitesse de disparition du monomère. Notons $[S]$ la concentration globale en radicaux propagateurs de chaîne :

$$[S] = \sum_{k=1}^{\infty} [R-M_k\bullet].$$

B2*a. Dans l'hypothèse de polymères à chaînes longues, comparer la vitesse des deux premières étapes aux vitesses des étapes de propagation de la chaîne. En déduire que la vitesse de polymérisation V_p peut s'écrire sous la forme : $V_p = k_p [M] [S]$.

B2*b. Appliquer l'hypothèse de l'état quasi-stationnaire à chaque intermédiaire réactionnel $R-M_j\bullet$; en déduire l'expression de $[S]$ en fonction de V_i et k_t .

B2*c. Ecrire l'expression finale de la vitesse de polymérisation V_p en fonction de k_a , k_p , k_t , f , $[A]$ et $[M]$. Montrer que la constante de vitesse apparente de polymérisation s'écrit sous la

$$\text{forme : } K = k_p \sqrt{2f \frac{k_a}{k_t}}.$$

B3*a. En admettant que seule se produit la terminaison par dismutation, définir la vitesse de terminaison V_t . Préciser son expression en fonction de k_t et de $[S]$, sachant qu'elle est indépendante de la longueur de la chaîne.

B3*b. Comparer les vitesses d'initiation V_i et de terminaison V_t . Commenter.

C / ANALYSE DE RESULTATS EXPERIMENTAUX

La variation de la vitesse de polymérisation V_p du PMMA en fonction de la concentration $[M]$ en monomère est représentée sur la figure 4, d'après les travaux de Sigimura et Minoura.

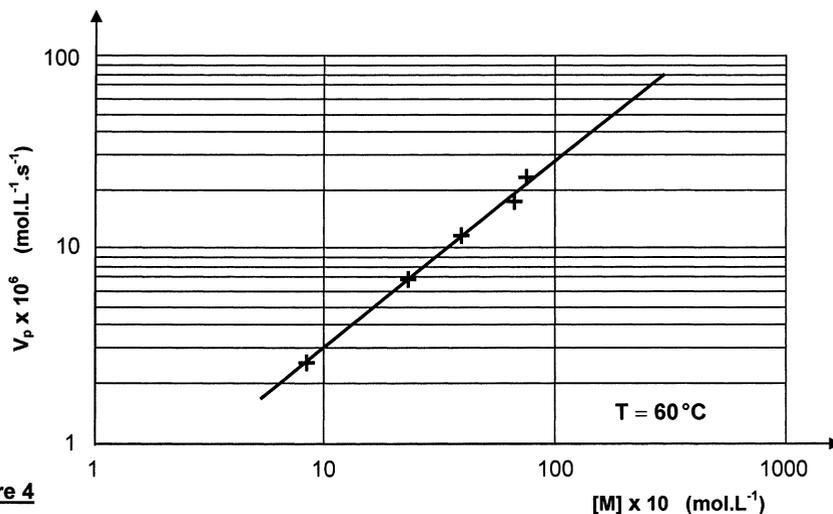


Figure 4

C1*a. Préciser, à l'aide de cette courbe, l'ordre de la réaction vis à vis du monomère M.

C1*b. A partir de la figure 4, pour une concentration en amorceur $[A]$ de $6,6 \cdot 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$, calculer la valeur de $\frac{k_p^2}{k_t}$, sachant que $f = 0,8$ et $k_a = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour le peroxyde de dibenzoyle.

Afin de préciser les valeurs des constantes k_p et k_t , il faut mesurer le temps de vie moyen des radicaux à l'état stationnaire ; ce temps est défini par la relation : $\tau_s = \frac{[S]}{V_t}$.

C2*a. Exprimer le temps de vie moyen τ_s en fonction de K , k_p , k_t et $[A]$. En déduire la relation permettant d'écrire le rapport $\frac{k_p}{k_t}$ en fonction de K , τ_s et $[A]$.

La durée de vie τ_s pour la polymérisation du PMMA est déterminée à 60 °C par une méthode optique de suivi de polymérisation.

C2*b. Sachant que $\tau_s = 7,5 \text{ s}$ pour une concentration en amorceur $[A]$ de $6,6 \cdot 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$, calculer numériquement les constantes K , k_p et k_t .

Etudions maintenant l'influence de la température sur cette cinétique et reprenons l'expression de la constante de vitesse apparente K .

C3*a. Sachant que chacune des constantes de vitesses k_a , k_p , k_t suit une loi d'Arrhenius et en supposant que f est indépendant de la température, déterminer l'expression de K en fonction de la température, en introduisant les énergies d'activation d'amorçage E_a , de propagation E_p et de terminaison E_t . En déduire l'énergie d'activation apparente E_{app} .

C3*b. Si la température T de polymérisation (60°C) s'élève d'une quantité ΔT , écrire la variation ΔV_p de la vitesse de polymérisation.

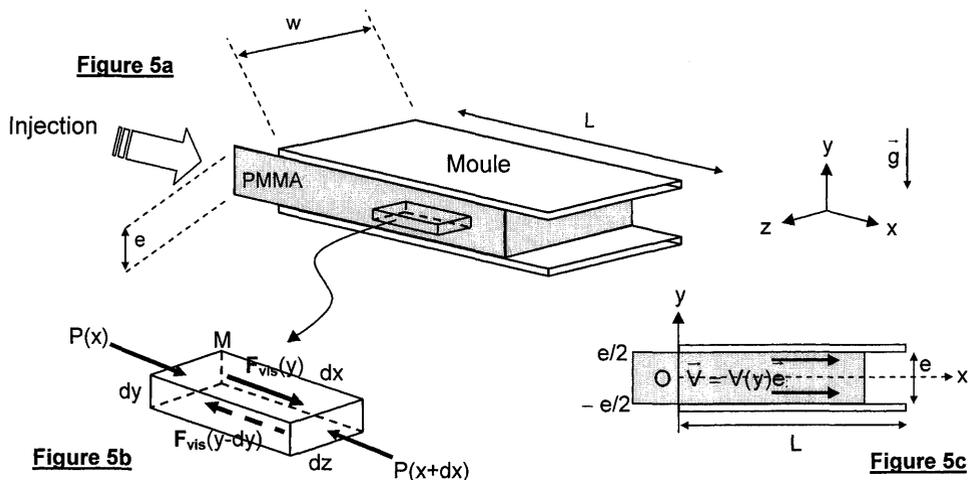
Exprimer et calculer la variation relative de vitesse apparente, dans le cas où $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, avec $E_a = 248 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, $E_p = 42 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, $E_t = 8 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ et $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Analyser le résultat obtenu.

DEUXIEME PARTIE REALISATION DE PLAQUES DE PMMA PAR INJECTION

Intéressons-nous à la mise en forme d'une plaque telle une baie « vitrée » de cabine de téléphone ou de douche en PMMA. Le procédé utilisé consiste en l'injection du polymère fondu dans un moule maintenu à température sensiblement constante (30 à 60°C) de forme parallélépipédique de longueur L , de largeur w et d'épaisseur e , comme le montre la *figure 5a*. (échelle non respectée pour plus de clarté).

Le moule en acier est pourvu d'un circuit de refroidissement (par des canaux internes), de capteurs de température et d'un circuit de contrôle automatique de régulation thermique. La matière première se présente sous la forme de granulés, portés à fusion à une température comprise entre 180 et 300°C grâce à un dispositif non représenté sur la figure puis est injectée sur toute la largeur w du moule, par application d'une surpression ΔP à l'extrémité $x = 0$.



Le polymère fondu s'écoule selon la direction Ox entre deux plaques parallèles ; ces plans d'équation $y = \pm e/2$ constituent les parois inférieure et supérieure du moule. L'écoulement est réalisé dans le champ de la pesanteur, depuis l'ouverture du moule d'abscisse $x = 0$ où règne la pression $P_0 + \Delta P$ ($\Delta P > 0$) vers l'extrémité du moule d'abscisse $x = L$ où règne la pression P_0 .

Les dimensions du système dans les directions x et z sont très supérieures à l'épaisseur e du moule ; les plans horizontaux peuvent ainsi être considérés comme infinis et les effets de bord (selon les parois verticales $z = \pm w/2$) sont négligés.

Le polymère fondu est assimilé à un fluide newtonien incompressible de viscosité dynamique η , de masse volumique μ , de capacité thermique massique C et de conductivité thermique λ .

L'espace est rapporté au trièdre cartésien Oxyz, de base orthonormée directe $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$.

Hypothèse : l'écoulement est réalisé en régime permanent

Données : moule de dimensions : $L = 2 \text{ m}$, $w = 1 \text{ m}$ et $e = 20 \text{ mm}$
 η (à $200 \text{ }^\circ\text{C}$) = $10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; $\mu = 1190 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $C = 1470 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $\lambda = 0,19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
différentiel de pression $\Delta P = 2 \cdot 10^7 \text{ Pa}$.

D / ECOULEMENT DE POISEUILLE PLAN

D1. Déterminer la répartition du champ de vitesse entre les plans d'équation $y = \pm e/2$, en justifiant que la vitesse peut s'écrire : $\vec{V}(M, t) = V(y) \vec{e}_x$.

L'écoulement peut être représenté comme la superposition d'une infinité de lames fluides élémentaires (comme représenté sur la [figure 5b](#)), la lame comprise entre les ordonnées y et $y - dy$ (avec $dy > 0$), attachée au point $M(x, y, z)$ possédant une vitesse $V(y)$.

Le frottement entre une lame et les lames supérieure et inférieure directement à son contact se traduit par une force tangentielle de viscosité (dite de cisaillement), parallèle à la direction de l'écoulement et dont la norme s'écrit : $F_{\text{vis}} = \eta S \frac{\partial v}{\partial y}$, S étant la surface de contact entre les lames adjacentes.

D2. Que représente η ? Préciser ses dimensions et son unité.

D3. Rappeler la définition d'un fluide newtonien ; existe-t-il d'autres types de fluides ? Citer des exemples.

Les forces de pesanteur qui s'appliquent sur tout élément de fluide sont très largement inférieures aux forces de frottement fluide et de pression. Ainsi l'action de la pesanteur pourra être négligée dans la suite de cette étude.

E / PROFIL DE VITESSE ENTRE LES PLAQUES

Rappelons que, dans un écoulement de fluide newtonien incompressible, le champ de vitesse $\vec{v}(M, t)$ et le champ de pression $P(M, t)$ sont reliés par l'équation de Navier-Stokes :

$$\mu \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} \right] = \vec{f}_{\text{vol}} - \text{grad} P + \vec{f}_{\text{vol}, \text{vis}}$$

E1*a. Exprimer, en considérant l'élément de fluide de volume $d^3\tau = dx dy dz$ ([figure 5b](#)), la force volumique de viscosité $\vec{f}_{\text{vol}, \text{vis}}$.

E1*b. Simplifier la relation de Navier-Stokes, sachant que l'écoulement est stationnaire et unidirectionnel selon Ox. En déduire l'équation différentielle vérifiée par la pression P puis montrer que la quantité dP/dx est une constante K à expliciter en fonction de ΔP et L . Justifier physiquement le signe de K .

E2*a. Préciser les conditions aux limites imposées par les parois du moule en $y = \pm e/2$.

E2*b. Déterminer l'expression de la vitesse $V(y)$ en fonction de y , K , e et de la viscosité dynamique. Exprimer la vitesse maximale V_{\max} de l'écoulement puis écrire la vitesse $V(y)$ en fonction de V_{\max} et de la quantité adimensionnée $(2y/e)$.

E2*c. Représenter le profil de vitesse $V(y)/V_{\max}$ dans un plan de coupe du moule (*figure 5c*).

E3*a. Exprimer le débit volumique Q_v (pour une largeur w du moule dans la direction Oz) en fonction de V_{\max} , e et w ; en déduire la vitesse moyenne \bar{V} de l'écoulement.

E3*b. Calculer, à l'aide des données fournies, la vitesse V_{\max} , la vitesse moyenne \bar{V} , le débit Q_v . Définir puis évaluer le nombre de Reynolds R_e et commenter la valeur obtenue.

Le temps de séjour de la matière introduite dans le moule est défini comme le rapport de la longueur de l'écoulement à sa vitesse moyenne.

E4*a. Exprimer le temps de séjour minimum t_{\min} ?
Définir le temps de séjour moyen t_{moy} en fonction du volume de matière dans le moule et du débit volumique puis l'exprimer en fonction de K , η , L et e .

E4*b. Exprimer le temps de séjour $t(y)$ pour une tranche de fluide puis le rapport $\frac{t(y)}{t_{\min}}$ en fonction de la variable $(2y/e)$. Analyser cette expression en traçant schématiquement ce rapport en fonction de la variable $(2y/e)$.

E4*c. Calculer t_{\min} et t_{moy} à l'aide des données fournies.

TROISIEME PARTIE

CONTROLE DE L'INDICE DE REFRACTION DU PMMA PAR INTERFEROMETRIE OPTIQUE

L'interférométrie est une méthode de mesure très précise utilisée pour la détermination de variations de longueurs, d'épaisseurs de couches ou d'indices de réfraction.

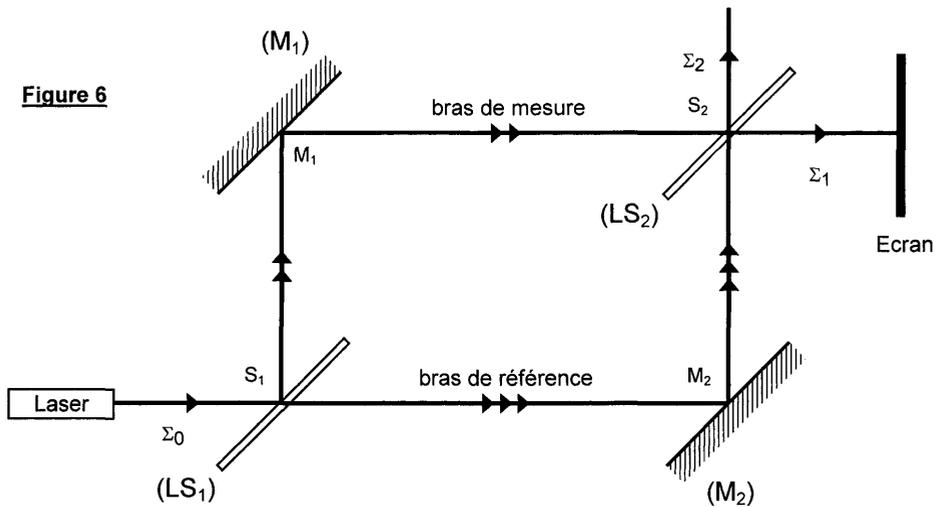
*Tout comme celui de Michelson, l'interféromètre de Mach-Zehnder (*figure 6*) est un interféromètre à deux faisceaux qui fonctionne selon le principe suivant : le faisceau lumineux cohérent, noté Σ_0 , issu d'un laser hélium-néon (source monochromatique, de longueur d'onde λ_0 , d'intensité ou éclairement \mathcal{E}_0) est divisé en deux faisceaux de même intensité (bras de référence et bras de mesure) par une lame séparatrice (LS_1) ; ces derniers suivent des trajectoires orthogonales, sont réfléchis par des miroirs identiques (M_1) et (M_2), disposés parallèlement, puis sont recombinaés par une seconde lame séparatrice (LS_2), identique et parallèle à la précédente, dont ils émergent parallèles l'un à l'autre.*

A l'émergence, ils donnent naissance à deux faisceaux orthogonaux notés Σ_1 et Σ_2 . Par construction et réglage optique les distances $S_1M_1S_2$ et $S_1M_2S_2$ sont égales. Un écran est disposé orthogonalement à la direction du faisceau Σ_1 , à la distance D de S_2 .

F / ETUDE PRELIMINAIRE

Les deux bras de l'interféromètre sont vides dans un premier temps.

Les réflexions en M_1 et M_2 sur les miroirs parfaitement réfléchissants introduisent un déphasage de π . Les coefficients complexes de réflexion $\underline{\rho}$ et de transmission $\underline{\tau}$ (pour les amplitudes) de chacune des séparatrices valent respectivement : $\underline{\rho} = \frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\pi/2}$ et $\underline{\tau} = \frac{\sqrt{2}}{2}$.



- F1.** Exprimer les amplitudes complexes $\underline{\mathcal{A}}_1$ et $\underline{\mathcal{A}}_2$ des faisceaux transmis Σ_1 et Σ_2 en fonction de l'amplitude complexe \underline{a}_0 du faisceau Σ_0 . En déduire les éclaircements \mathcal{E}_1 et \mathcal{E}_2 des faisceaux Σ_1 et Σ_2 . Analyser ces résultats et préciser l'aspect de l'écran.

Une lame mince de PMMA (à faces parallèles) L_1 , d'indice de réfraction n et d'épaisseur e est introduite dans le bras de référence entre S_1 et M_2 , perpendiculairement au faisceau, le bras de mesure étant vide. Les phénomènes de réflexion sur les faces de la lame ainsi que toute absorption par le matériau ne seront pas prises en compte dans cette étude.

- F2*a.** Exprimer l'accroissement de chemin optique $\delta\ell_1$ du trajet $S_1M_2S_2$ dû à l'introduction de L_1 , puis le déphasage entre les deux faisceaux recomposés à la sortie de (LS_2) en direction de l'écran. En déduire l'éclaircissement \mathcal{E} sur l'écran en fonction de \mathcal{E}_0 , n , e et λ_0 .

- F2*b.** Dans quelles conditions l'éclaircissement de l'écran peut-il être maximal ou minimal, pour une lame d'indice n donné ? Cet éclaircissement varie-t-il d'un point à l'autre de l'écran ? Que se passe-t-il si la lame est déplacée entre S_1 et M_2 , parallèlement à elle-même ?

Une lame L_2 , de même indice et de même épaisseur que la précédente est introduite dans le bras de mesure entre M_1 et S_2 , perpendiculairement au faisceau, tandis que la lame L_1 demeure dans le bras de référence.

- F3.** Décrire (en le justifiant) l'aspect de l'écran.

La lame L_2 , montée sur une platine goniométrique, peut tourner grâce à un moteur de précision, fonctionnant pas à pas, de sorte que sa normale forme un petit angle θ (de l'ordre de 0,1 rad) par rapport au faisceau. L'angle du faisceau réfracté en J est noté r ; le faisceau émerge en K (figure 7).

La lame L_1 , quant à elle, demeure toujours perpendiculaire au faisceau qui la traverse.

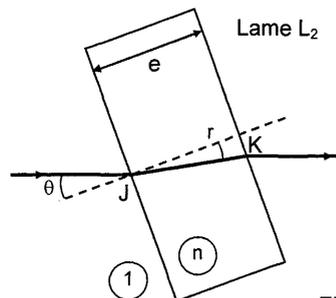


Figure 7

F4*a. Tracer, sur une reproduction de la figure 7, les plans d'onde (notés respectivement Π , Π_J , Π_K et Π') avant la traversée de la lame, en J et K, puis après la traversée.

F4*b. Exprimer l'accroissement du chemin optique $\delta\ell_2$ du trajet $S_1M_2S_2$, par l'introduction de la lame L_2 (inclivée d'un angle θ) dans le bras de mesure et montrer qu'il peut s'écrire :

$$\delta\ell_2 = \frac{e}{\cos r} [n - \cos(\theta - r)].$$

L'angle θ (et par conséquence l'angle r) étant petits, les approximations suivantes pourront être réalisées : $\sin x \approx x$ et $\cos x \approx 1 - \frac{x^2}{2}$. Par ailleurs : $\cos(a - b) = \cos a \cdot \cos b + \sin a \cdot \sin b$.

F4*c. Ecrire $\delta\ell_2$ en fonction de e , n et θ .

F4*d. Montrer que la différence de marche $\delta\ell$ entre les deux faisceaux qui émergent de (LS_2) en direction de l'écran peut s'écrire : $\delta\ell = e\theta^2 f(n)$, $f(n)$ étant une fonction de l'indice n de la lame, à expliciter. En déduire le déphasage $\delta\phi$ correspondant.

F4*e. Expliquer pourquoi les deux faisceaux interfèrent sur l'écran. Exprimer l'éclairement résultant $\mathcal{E}(\theta)$ sur l'écran, en fonction de \mathcal{E}_0 , n , e , θ et λ_0 . Décrire l'aspect de l'écran.

Grâce au moteur pas à pas, la lame L_2 est mise en rotation, l'angle d'inclinaison croissant à partir de zéro, mais en demeurant relativement petit.

F5*a. Montrer que l'éclairement sur l'écran varie entre des valeurs maximale \mathcal{E}_{\max} et minimale \mathcal{E}_{\min} (qui seront précisées) pour deux familles d'angles respectivement notés θ_{\max} et θ_{\min} .

Exprimer (en mrad) les trois premières valeurs $\theta_{i\max}$ et $\theta_{i\min}$ des différents angles en

fonction d'un angle noté $\theta_0 = \sqrt{\frac{n \lambda_0}{n-1} e}$, puis les calculer sachant que $e = 20$ mm et $\lambda_0 = 632,8$ nm et que n sera pris de l'ordre de 1,5.

F5*b. Représenter (tracé à main levée) les variations de l'éclairement \mathcal{E} de l'écran en fonction de l'angle θ (exprimé en rad) pour des faibles valeurs de cet angle. Commenter le tracé obtenu.

F5*c. L'approximation réalisée sur les expressions de $\cos\theta$ et $\cos r$ (question F4*b) ne demeurant valable que pour une variation relative d'accroissement de chemin optique $\frac{\delta\ell_2 - \delta\ell_1}{\delta\ell_1}$ inférieure à 1%, quelle est la valeur limite θ_{lim} (exprimée en rad) admissible de θ ?

G / DETERMINATION PRECISE DE L'INDICE DE REFRACTION

L'étude précédente a montré que l'indice de réfraction était accessible à partir de mesures des angles de rotation de la lame L_2 . Elle est toutefois limitée à de petits angles θ . La détermination précise de l'indice de réfraction nécessite de tourner la lame d'un angle nettement supérieur aux valeurs limites précédentes.

G1. Expliquer pourquoi la précision sur n est tributaire d'une valeur plus élevée de l'angle θ .

Il conviendra, pour évaluer précisément n , de reprendre le calcul exact de la différence de marche globale $\delta\ell$ afin d'aboutir à une relation linéaire du type $g(n) = 0$.

G2*a. Ecrire tout d'abord le rapport $\frac{\delta\ell}{e}$ en fonction de n , $\sin \theta$, $\cos \theta$, $\sin r$ et $\cos r$ (relation R1)

Appliquer la loi de Descartes (relation R2) au point J (figure 8) afin d'exprimer (relation R3)

$\cos r$ en fonction de n , $\sin^2\theta$ et de la quantité $X = \left(\frac{\delta\ell}{e} - 1 + \cos \theta \right)$.

Injecter $\cos^2 r$ dans la relation R2, afin d'établir l'expression suivante, vérifiée par l'indice n :

$$An^3 + Bn^2 + Cn + D = 0 \quad (\text{relation R4}).$$

Exprimer les paramètres A, B, C et D en fonction de X, X^2 et $\sin^2\theta$.

G2*b. Sachant qu'il est possible de repérer une $p^{\text{ème}}$ valeur maximale (ou minimale) d'éclairement pour un angle θ_p mesuré avec précision, écrire X_p en fonction de p , λ_0 , et l'angle θ_p , puis montrer que les quatre paramètres A, B, C et D sont accessibles à la mesure.

La résolution de cette relation R4, de type $g(n) = 0$, nécessite une résolution informatique (numérique) si l'indice doit être connu avec précision.

Imaginons plutôt le scénario suivant : après la fabrication d'une plaque de PMMA, le contrôle qualité impose de vérifier les principales caractéristiques mécaniques et physiques, parmi lesquelles l'indice de réfraction n . Deux éprouvettes de mêmes dimensions sont découpées dans la plaque puis glissées respectivement dans chacun des bras de l'interféromètre. Le repérage, par la photodiode du $p^{\text{ème}}$ éclairement maximal (par exemple) est corrélé à une rotation de l'axe du moteur et donc à une valeur θ_p .

Le contrôleur doit vérifier que l'indice du PMMA, compte tenu des conditions d'élaboration, doit se situer dans la fourchette suivante : $n = 1,493 \pm 0,002$.

Les lames utilisées dans le test ont été usinées avec précision pour que leur épaisseur e soit égale à 20,00 mm. Le laser hélium-néon émet une longueur d'onde λ_0 de 632,8 nm.

G3*a. La valeur cible de l'indice n étant fixée, reprendre la relation R4 afin d'établir la relation R5 vérifiée par la grandeur X précédemment définie : $X^2 + 2nX + \sin^2\theta_p = 0$.

G3*b. Résoudre cette dernière équation, avec la précision requise, pour chacune des bornes de l'intervalle de confiance de n . Calculer les valeurs correspondantes de la quantité $\frac{\delta\ell}{e}$.

G3*c. Quel sera le nombre p de maxima d'éclairement que l'observateur verra défiler sur l'écran, pour un angle de rotation de la lame $\theta_p = 15,52^\circ$?

Analyser ce résultat, compte tenu de la fourchette de valeurs imposée par le contrôle qualité.

Proposer un dispositif technique simple permettant d'améliorer la précision de cette détermination.

FIN DE L'ÉPREUVE