

**CONTROLE TERMINAL – SESSSION 1**

Durée : 2h 00 min

***Pas de documents, pas de téléphone portable, Calculatrice autorisée***  
***prenez soin de justifier vos réponses et de respecter les notations employées (cela sera pris en compte dans la notation)***

NOM :

**Question en lien avec le cours** *(cochez le ou les bonnes réponses)* :**7 points**

**Attention :** Les questions proposées peuvent avoir une seule ou plusieurs réponses correctes (voire éventuellement toutes les réponses correctes).

**Notation :** Au sein de la même question : + ¼ pt par réponse juste ; - ¼ pt par réponse fausse.

**1) L'optique de Fourier :**

- a été explicitement proposée par Joseph Fourier.
- est incompatible avec l'optique géométrique.
- a un lien fort avec la Bourgogne.
- prend intrinsèquement en compte la diffraction.

**2) Les coefficients de Fresnel**

- sont indépendants de la nature vectorielle de la lumière
- permettent de calculer une figure de diffraction
- sont basés sur le calcul d'une intégrale particulière
- permettent notamment de prédire la valeur de l'angle de Brewster

**3) Un polariseur peut être réalisé :**

- par une succession de lames à l'angle de Brewster.
- par l'interférence de deux ondes.
- par diffraction d'une ouverture circulaire.
- par un empilement adapté de couches minces.
- par un milieu présentant une activité optique.

**4) L'effet Kerr est :**

- un effet linéaire.
- un effet non-linéaire.
- permet de contrôler les propriétés de biréfringence grâce à un champ électrique externe.
- affecte la figure de diffraction

**5) La finesse d'un dispositif interférométrique**

- ne dépend pas des détails du montage interférométrique si celui-ci est un montage à deux ondes à division de front d'onde.
- diffère suivant le montage interférométrique (i.e., à deux ondes ou à ondes multiples).
- augmente généralement quand le contraste de celui-ci augmente
- influe sur les performances d'un analyseur de spectre optique
- peut être appliquée à un réseau de diffraction

6) Les processus d'interférences

- nécessitent une grande stabilité pour être observés.
- permettent de créer de l'énergie.
- sont adaptés aux échantillons transparents.
- permettent de convertir une variation de phase en une variation d'intensité.

7) Pour un interféromètre présentant une différence de marche  $\delta$  entre deux ondes successives, l'intervalle spectral libre exprimé en GHz sera

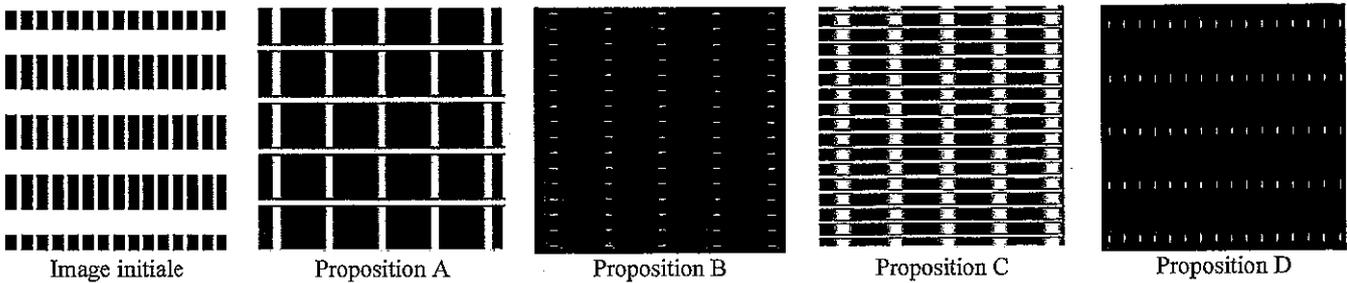
- proportionnel à  $\delta$
- inversement proportionnel à  $\delta$
- plus faible pour un interféromètre à deux ondes que pour un Fabry Pérot.
- plus élevé pour un interféromètre à deux ondes que pour un Fabry Pérot.
- identique pour un interféromètre à deux ondes et pour un Fabry Pérot.

8) La spirale de Cornu ou clothoïde

- permet de calculer la figure de diffraction d'une ouverture triangulaire
- permet de calculer la figure de diffraction d'une fente, mais le résultat n'est plus valide dans le régime de Fraunhofer
- repose sur le calcul des intégrales de Fresnel
- nécessite le calcul de transformées de Fourier
- est symétrique par rapport à l'axe des abscisses

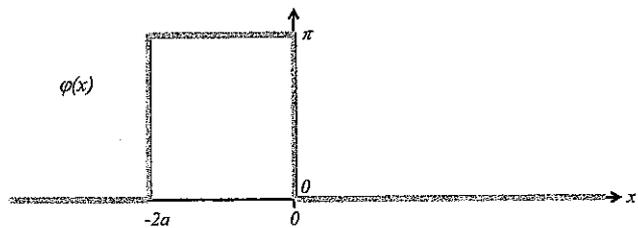
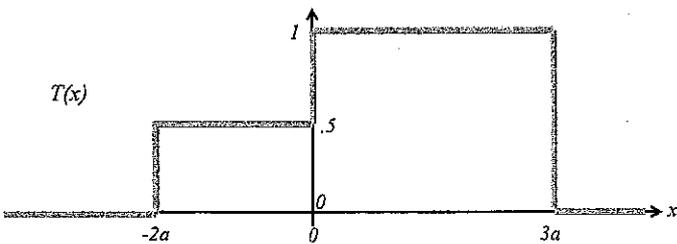
9) Parmi les figures suivantes, sélectionner la figure de diffraction correspondant qualitativement à la figure de diffraction de l'image initiale (les zones noires représentent les zones opaques, les zones blanches les zones transparentes, aucun déphasage n'étant introduit par la pupille) :

- proposition A
- proposition B
- proposition C
- proposition D



10) La fonction transparence pupillaire  $f(x)$  donnée figure ci-dessous peut s'exprimer de la manière suivante avec  $\Pi_a$  la fonction porte de largeur  $a$  et  $T(x)$  et  $\varphi(x)$  l'amplitude et la phase de la transparence pupillaire :

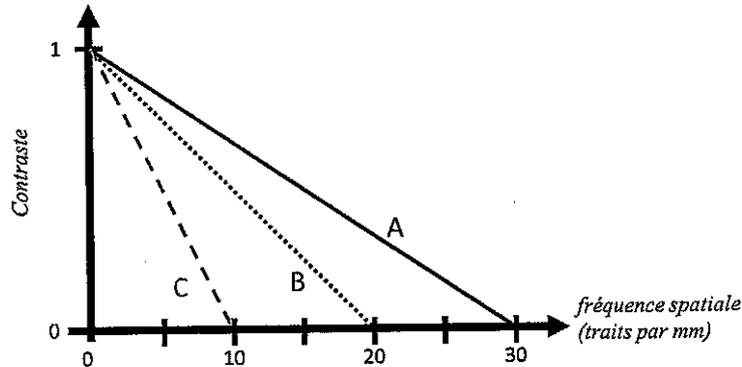
- $f(x) = \Pi_{5a}(x) e^{i\pi}$
- $f(x) = -\frac{1}{2} \Pi_{2a}(x+a) + \Pi_{3a}(x-3a/2)$
- $f(x) = \Pi_{2a}(x) e^{i\pi} + \Pi_{3a}(x)$
- $f(x) = \frac{1}{2} \Pi_{2a}(x) * \delta(x+a) e^{i\pi} + \Pi_{3a}(x) * \delta(x-3a/2)$



11) L'image formée par un objet en présence de diffraction

- ne varie pas en fonction de la longueur d'onde
- est influencée par la cohérence de l'éclairage
- peut être calculée en utilisant des transformées de Fourier
- peut être calculée à partir d'une opération de corrélation optique

12) Les fonctions de transfert de modulation de trois dispositifs sont représentées figure ci-dessous.



- Le dispositif le plus performant est le A
- Le dispositif le plus performant est le B
- Le dispositif le plus performant est le C

13) La tâche d'Airy

- est exprimée à partir d'une fonction lorentzienne
- est d'autant plus grande que l'ouverture est grande
- fait intervenir des fonctions de Bessel
- est caractéristique d'une ouverture rectangulaire

14) L'échelle de teintes de Michel Levy (ou teintes de Newton)

- permet de connaître les propriétés de lames cristallines
- repose sur un processus d'interférences à deux ondes
- peut expliquer les irisations d'une bulle de savon
- ne dépend pas du réglage de l'analyseur et du polariseur
- est utilisée en microscopie

15) Dans un milieu anisotrope :

- Le vecteur d'onde et le vecteur de Poynting sont toujours confondus
- Un rayon incident donne toujours un rayon émergent unique
- Il est possible de séparer spatialement les composantes de polarisation grâce à un milieu anisotrope
- La construction de Huygens-Fresnel reste valide

16) Quel est/sont le ou les inventeurs du laser parmi les scientifiques suivants?

- Albert Einstein
- Alfred Kastler
- Théodore Maiman
- Charles Townes

17) Sur quel(s) paramètre(s) physique du laser joue la cavité Fabry-Pérot (nommée cavité laser) ?

- le spectre d'émission laser
- la directivité de l'émission laser
- l'éclairement énergétique du faisceau laser

**Exercice 1 : Optique anisotrope dans une lame de calomel :**

**4 points**

Le calomel (également appelé chlorure mercureux ou chlorure de mercure, de formule  $Hg_2Cl_2$ ) est un cristal qui présente une anisotropie extrêmement forte. C'est un milieu uniaxe positif qui présente un indice ordinaire  $n_o$  de 1.973 et une biréfringence  $\Delta n$  de 0.683 aux longueurs d'onde visibles.

E1.1) Que vaut l'indice extraordinaire  $n_e$  de ce matériau ? **0.5 pt**

$n_e =$	$\approx$
<i>expression littérale</i>	<i>valeur numérique</i>

E1.2) On souhaite former à partir de ce matériaux biréfringent une lame de polarisation  $\lambda/2$  pour une longueur d'onde initiale de 683 nm. Quelle doit être l'épaisseur  $L$  de calomel utilisée ? (la lame de polarisation fonctionnera en transmission). Pour réduire l'absorption (on la négligera ici), on utilisera ici l'épaisseur la plus fine possible. **0.5 pt**

$L =$	$\approx$
<i>expression littérale</i>	<i>valeur numérique</i>

E1.3) On envoie sur cette lame une lumière polarisée linéairement verticalement de telle manière à ce que la direction de la polarisation soit à  $45^\circ$  des axes neutres de la couche. Quelle est la nature de la polarisation obtenue après passage dans la couche ? (on donnera la réponse sans démonstration) **0.5 pt**

<i>L'action de la lame <math>\lambda/2</math> est de</i>
<i>La polarisation de sortie est donc</i>

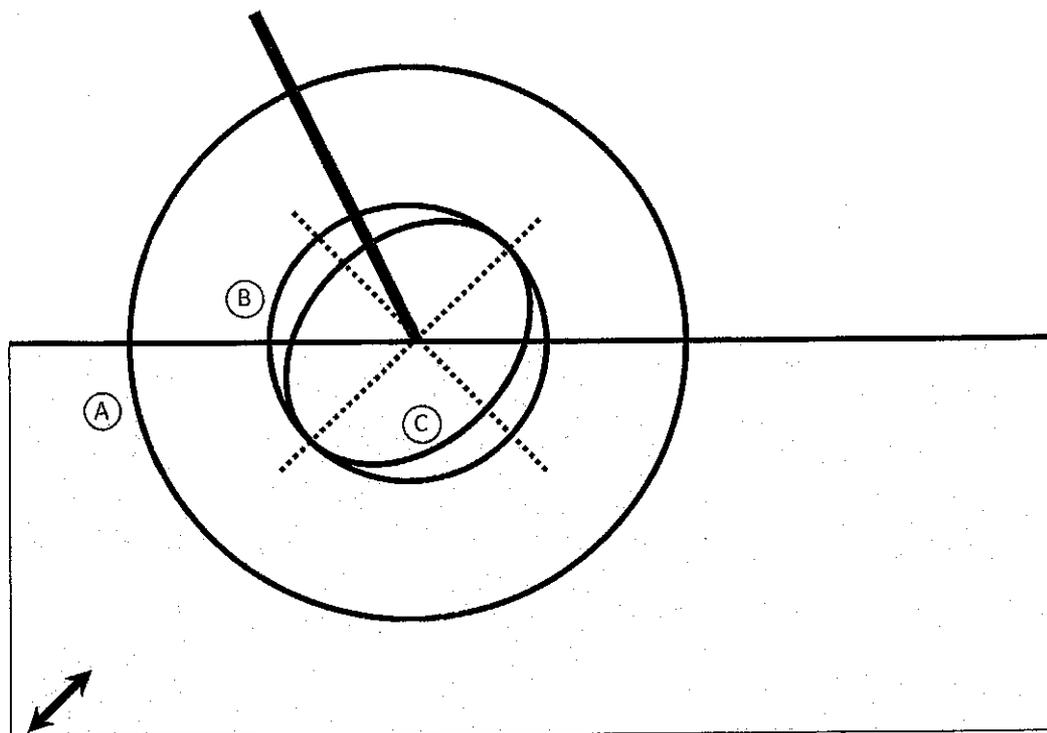
E1.4) On souhaite tracer l'évolution de la direction d'un rayon incident sur cette couche. Le milieu incident est de l'air. La méthode que l'on souhaite mettre en œuvre est la construction de Huygens. Sur quelle surface spécifique repose cette construction graphique du rayon lumineux ? **0.5 pt**

<i>La surface impliquée dans la méthode de Huygens est</i>
--

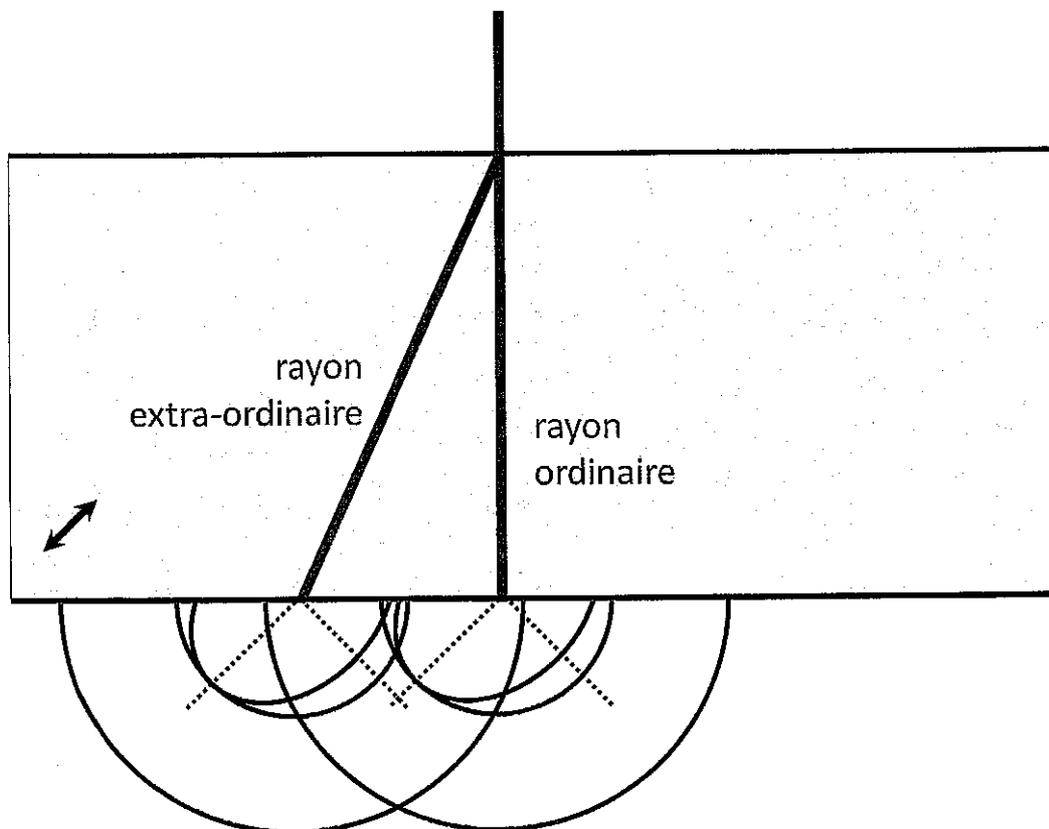
E1.5) Nous avons représenté la coupe de cette surface particulière dans le cas où l'axe optique est maintenant contenu dans le plan d'incidence et orienté à  $45^\circ$  de la normale. La figure donnée dans la question E1.6), identifiez les coupes relatives aux surfaces ordinaires et extraordinaires ainsi que celle relative au milieu incident. **0.5 pt**

<i>La surface A est reliée à</i>
<i>La surface B est reliée à</i>
<i>La surface C est reliée à</i>
<b>Justification :</b>

E1.6) Tracez les rayons ordinaires et extraordinaires sur la figures ci-dessous en utilisant la méthode de Huygens. Vous laisserez apparents les traits de construction et indiquerez quel est le rayon ordinaire et extra-ordinaire. On considère ici un rayon incident avec une incidence oblique. **1 pt**



E1.7) On considère maintenant une lame éclairée en incidence normale. Les rayons dans le matériau ont déjà été tracés et les surfaces caractéristiques pertinentes ont été tracées. Compléter la figure par les rayons émergents. **0.5 pt**



**Problème : Laser dans le moyen infrarouge**

**11.5 points**

Dans ce problème, nous allons nous intéresser à l'utilisation d'un laser émettant dans le moyen infra-rouge, un laser à fluorure de deutérium. Ce type de laser chimique émet à la longueur d'onde de 3.8 μm et peut être particulièrement puissant.

**Partie 1 : Focalisation du faisceau laser :**

**2.5 points**

On suppose que ce laser émet une onde monochromatique à une longueur d'onde λ. En toute rigueur nous devrions considérer que le faisceau du laser est de forme gaussienne, mais pour simplifier les calculs, nous l'approximerons ici par une onde plane. Il sera donc possible d'utiliser les formules démontrées en cours. On désire focaliser cette onde grâce à une lentille de diamètre D et de focale f'. La lentille est supposée ne pas introduire d'aberrations particulières. La distance d'un point de la lentille par rapport à l'axe optique est notée r et on notera cerc(r/D) la fonction définissant un disque de diamètre D.

P1.1) Quel est l'intérêt applicatif principal de focaliser le faisceau laser ?

0.5 pt

P1.2) En optique de Fourier, quelle est la fonction de transmission f(r) qui peut être associée à la lentille considérée ?

0.5 pt

$f(r) =$

P1.3) Comment s'appelle la tache caractéristique qui est obtenue au point de focalisation de la lentille ?

0.5 pt

*La forme caractéristique obtenue au point de focalisation est appelée*

P1.4) Donnez l'expression analytique du rayon r\_f caractéristique de cette tache en fonction de λ, D et f'.

0.5 pt

$r_f =$   
*expression littérale*

P1.5) Par rapport à un laser émettant dans le visible à λ\_v = 632.8 nm donnant un rayon de tache r\_fv, de quel facteur G = r/r\_fv la tache a-t-elle grossi / rétréci ?

0.5 pt

$G =$   
*expression littérale*

**Partie 2 : Traitement anti-reflet dans le moyen-infrarouge :**

**4 points**

La silice qui compose les lentilles traditionnelles utilisées dans le visible est un matériau qui devient opaque au-delà de 2.2 μm. Il faut donc se tourner vers un autre matériau. Le Germanium représente alors une alternative intéressante, étant transparent à 4 μm (on négligera toute absorption). Par contre, son indice est très différent de celui de la silice et est particulièrement élevé avec une valeur n de 4 dans le moyen IR. On considère que le faisceau arrive en incidence normale sur la lentille supposée mince et on considérera que le milieu incident est de l'air d'indice 1.

P2.1) Donner l'expression et la valeur numérique des coefficients de réflexion R et de transmission T en intensité sur la face d'entrée de la lentille.

1 pt

6/10

$R =$	$=$
<i>expression littérale</i>	<i>expression numérique</i>

P2.2) Calculez le coefficient de transmission total  $T_T$  de la lentille de germanium (on ne considérera pas ici les réflexions multiples en première approximation). 0.5 pt

$T_T =$	$=$
<i>expression littérale</i>	<i>expression numérique</i>

P2.3) A quels problèmes/ risques, les valeurs trouvées en P2.2 et P2.1 peuvent-elles conduire ? 0.5 pt

Pour éviter ces risques, il est indispensable d'appliquer un traitement anti-reflet sur les faces de la lentille germanium. On rappelle que les champs électromagnétiques au niveau de l'interface  $I$  peuvent être exprimés à partir du champ au niveau de l'interface  $II$  grâce à une matrice  $M$  :

$$\begin{pmatrix} E_I \\ H_I \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E_{II} \\ H_{II} \end{pmatrix}$$

dont les éléments sont

$$M = \begin{pmatrix} \cos(k_0 h) & -i \sin(k_0 h) / Y_1 \\ -i \sin(k_0 h) Y_1 & \cos(k_0 h) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}$$

avec  $k_0 = 2\pi / \lambda$ ,  $h$  la différence de marche optique entre l'interface  $II$  et  $I$  et  $Y_1$  l'admittance du milieu formant le traitement anti-reflet d'indice  $n_i$  donnée pour la situation étudiée par  $Y_1 = Y_0 n_i \cos(\theta)$  avec  $Y_0$  l'admittance du vide et  $\theta$  l'angle du faisceau par rapport à la normale dans le milieu.

Le coefficient de réflexion de l'empilement est donné par :

$$r = \frac{Y_i m_{11} + Y_i Y_s m_{12} - m_{21} - Y_s m_{22}}{Y_i m_{11} + Y_i Y_s m_{12} + m_{21} + Y_s m_{22}}$$

avec  $Y_i$  et  $Y_s$  étant respectivement les admittances de l'air et du substrat de Germanium et  $m_{ij}$  les valeurs de  $M$ .

P2.4) On considère une couche quart-d'onde avec toujours une incidence normale. En prenant en compte ces deux hypothèses, exprimez le coefficient de réflexion  $r$  uniquement en fonction des indices du germanium  $n$  et du matériaux composant le traitement anti-reflet  $n_i$ . 1 pt

$r =$

*expression littérale*

P2.5) Quelle condition sur  $n_I$  doit alors être vérifiée pour que le traitement anti-reflet soit optimum ?

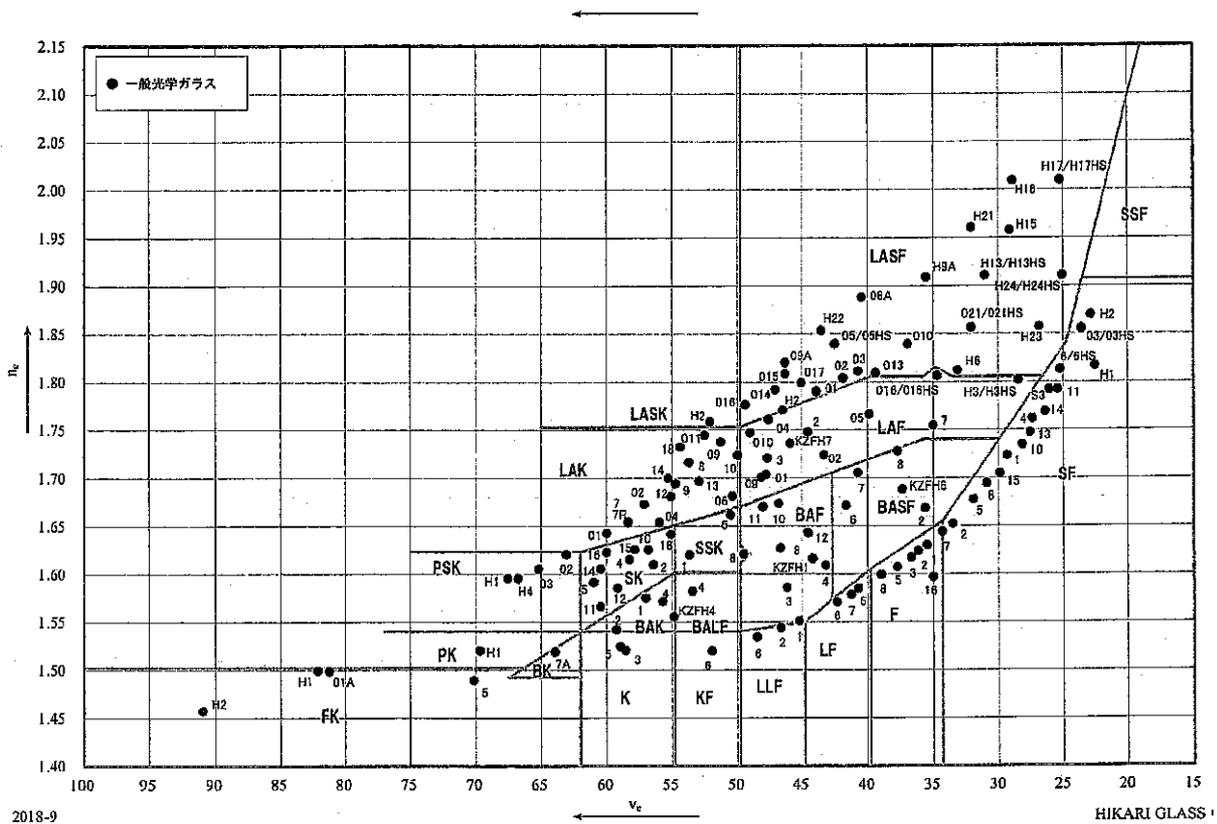
0.5 pt

$n_I =$	=
<i>expression littérale</i>	<i>expression numérique</i>

P2.6) La figure suivante représente la grande variété des familles de verres disponibles sur le marché (carte tirée ici du fabricant japonais Hikari). L'axe des abscisses est relié aux propriétés dispersives du verre (auxquelles nous ne nous intéressons aucunement ici) alors que l'axe vertical représente l'indice optique du verre.

0.5 pt

Un traitement optique anti-réfléchissant basé sur une seule couche peut-t-il être envisagé ? Si oui, entourez sur la carte les verres les plus intéressants à mettre en œuvre.



Traitement anti-réfléchissant monocouche possible = OUI NON

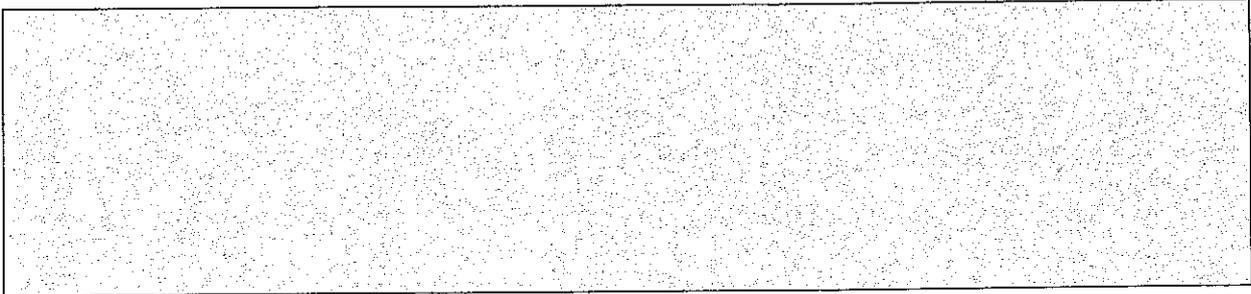
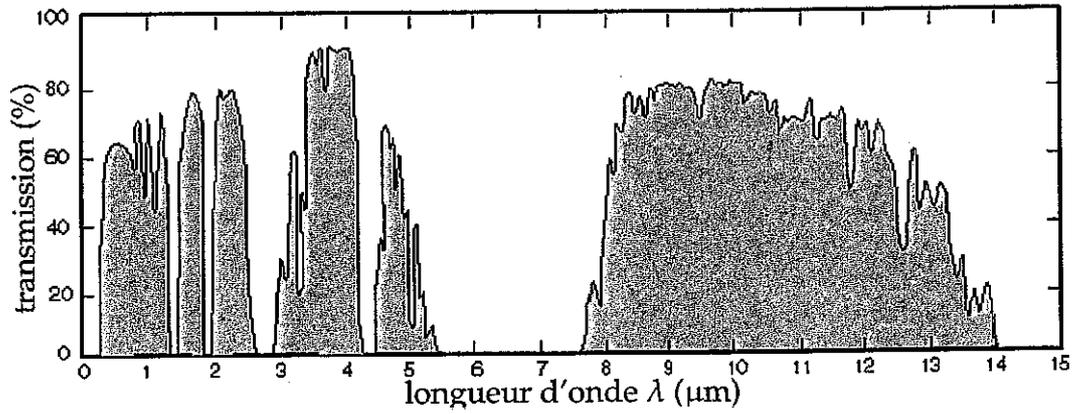
**Partie 3 : Applications du moyen infra-rouge :**

**4.5 points**

Le laser à fluorure de deutérium est un laser qui a notamment fortement intéressé l'industrie militaire américaine. Ainsi, le projet MIRACL (Mid-InfraRed Advanced Chemical Laser) a été développé par l'US Navy dès 1980 avec une puissance de l'ordre du MW. Il a notamment pu être testé contre un satellite de US Air Force en orbite à 432 km en 1997.

P3.1) En exploitant la figure suivante concernant la transmission de l'atmosphère, expliquez l'un des intérêts des lasers à fluorure de deutérium.

0.5 pt



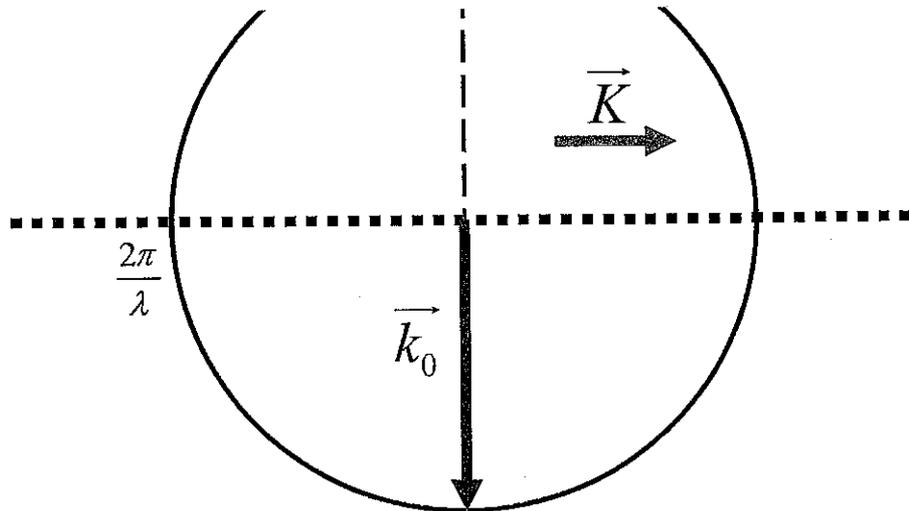
P3.2) Le domaine du moyen infra-rouge n'est pas restreint, loin de là, aux applications militaires. Il est très riche au niveau de l'analyse spectroscopique. Dans ce cas, les réseaux de diffraction sont d'un intérêt majeur. On considère ici un réseau de diffraction en transmission, avec un faisceau en incidence normale. Le pas du réseau est noté  $h$  et les milieux incidents et émergents sont tous deux de l'air. Rappelez la loi fondamentale des réseaux, appliquée au cas particulier considéré. 0.5 pt

Loi fondamentale des réseaux =  
expression littérale

Pour représenter les faisceaux émergents, il est également possible d'utiliser la construction de Descartes. Pour cela, nous avons représenté grâce à la surface des indices, le vecteur  $\vec{k}_0$  incident et un vecteur  $\vec{K}$  caractéristique du réseau utilisé de module  $K = 2\pi/h$ .

P3.3) Complétez la construction et faites apparaître les différents ordres de diffraction (vous laisserez apparents les traits de constructions). Combien de taches de diffraction peuvent être observées au maximum ? 1 pt

Nombre de tâches de diffraction observables =



P3.4) Quel problème va-t-on rencontrer si on utilise également ce réseau pour analyser la lumière émise d'un laser au thulium émettant à  $1.9 \mu\text{m}$  ? 0.5 pt

P3.5) Le réseau est en fait constitué de traits parallèles de largeur  $L$  orientés suivant la direction  $y$  ( $x$  et  $y$  représentent les coordonnées transverses). Exprimez la fonction de transparence  $f(x,y)$  du réseau en fonction des fonctions porte  $I_L$  (porte de la largeur totale  $L$ ) et du peigne de Dirac  $\text{III}_h$  (pour rappel  $\text{III}_h$  correspond à une succession de Dirac régulièrement espacés de  $h$ ). 0.5 pt

$$f(x,y) =$$

*expression littérale*

P3.6) En se plaçant à grande distance du réseau, quelle est de manière générale la relation entre l'image observée à une distance  $z$ ,  $I(x',y')$  et la fonction de transparence  $f(x,y)$  ? Le résultat pourra être donné à une constante multiplicative près et on notera  $F$  la transformée de Fourier de la fonction  $f$ . 0.5 pt

$$I(x',y') \propto$$

*expression littérale*

P3.7) Calculez l'image observée à une distance  $z$  dans le cas du réseau étudié. 1 pt

On rappelle notamment que :  $\text{TF}(I_L(t)) = L \text{sinc}(\omega L/2)$  avec  $\text{sinc}$  la fonction sinus cardinal  
 $\text{TF}(\text{III}_h(t)) = \text{III}_{2\pi/h}(\omega)$   
 $\text{TF}(A(t)*B(t)) = \text{TF}(A(t)) \times \text{TF}(B(t))$  avec  $A$  et  $B$  deux fonctions

$$I(x',y') \propto$$

*expression littérale*

P3.7) On considère le cas particulier où  $L = h/2$ . Que peut-t-on alors dire de l'amplitude de l'ordre 2 ? 0.5 pt