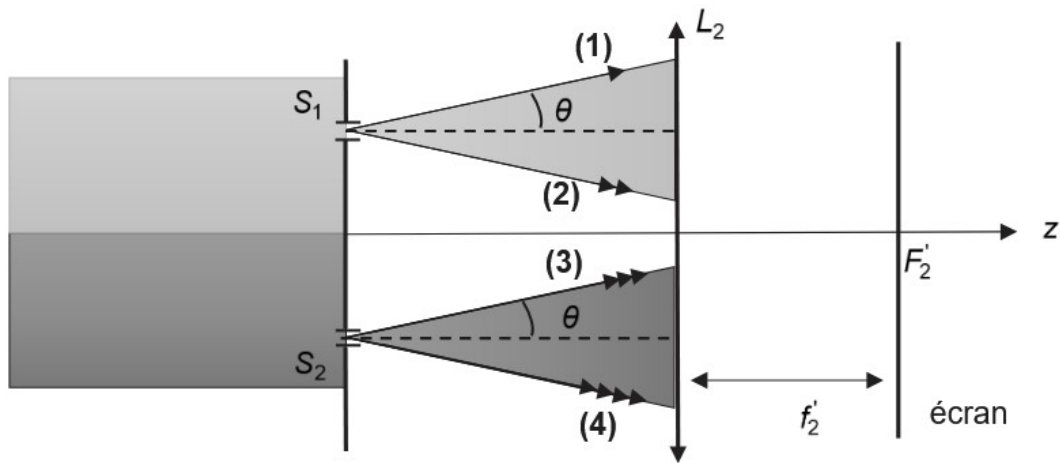


DM SCIENCES PHYSIQUES N°5

**Problème 1 :**

La vitesse d'un fluide peut se mesurer par une méthode interférentielle. En faisant traverser un fluide contenant des particules réfléchissantes à travers un système de franges, celles-ci passent alternativement par les franges brillantes et sombres. La lumière réfléchie est alors captée par un photodétecteur permettant la mesure de la durée mise par une particule réfléchissante pour parcourir un interfrange. On a alors accès à la vitesse du fluide.

Dans le montage des trous d'Young, chaque trou suffisamment petit diffracte le faisceau de lumière incident. En sortie, le faisceau diverge avec un demi-angle au sommet  $\theta$  identique pour les deux trous. On place un écran au foyer image d'une lentille  $L_2$ .

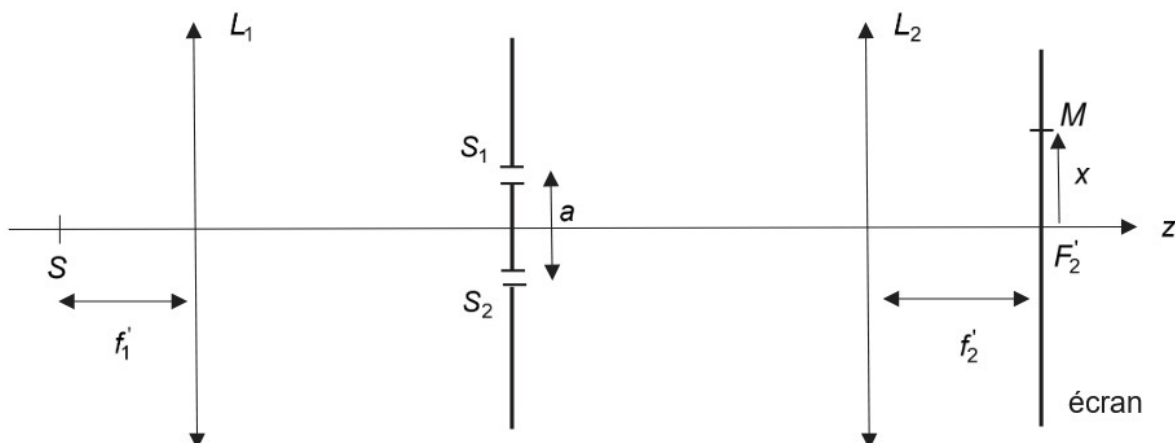


On prend l'indice du milieu égal à 1 .

1- Représenter sur le document réponse les rayons émergents atteignant l'écran et issus des rayons incidents (1), (2), (3) et (4).

2- Faire alors apparaître sur ce schéma la largeur  $l$  du champ d'interférences sur l'écran. Montrer que dans les conditions de Gauss, que l'on rappellera, cette largeur peut s'écrire :  $l \approx 2 f_2' \theta$

Pour produire le faisceau de lumière incident, on place une source ponctuelle S sur le foyer objet d'une lentille convergente  $L_1$ . Un point M sur l'écran sera repéré par son abscisse x ( figure ci-dessous ) ..



3- Un tel montage permet de produire un faisceau de lumière parallèle. Quel instrument d'optique, utilisé notamment dans un goniomètre, réalise une telle opération ?

4- Compléter le document réponse en traçant deux rayons lumineux partant de S pour aller à M, l'un passant par  $S_1$  et l'autre par  $S_2$ .

5- Faire apparaître sur le schéma précédent (document réponse) l'allure d'au moins deux surfaces d'onde :

- entre S et  $L_1$  ;
- entre  $L_1$  et les fentes d'Young ;
- entre les fentes d'Young et  $L_2$  ;
- entre  $L_2$  et M .

Quel théorème est utilisé ici pour tracer ces surfaces d'onde ?

Dans le vide, l'onde émise par la source est monochromatique de longueur d'onde  $\lambda_0$ .

6- Déterminer la différence de marche  $\delta(M) = (S S_2 M) - (S S_1 M)$ . En déduire l'expression de l'ordre d'interférences  $p(M)$  en fonction de  $a$ ,  $x$ ,  $\lambda_0$  et de  $f_2'$ .

7- Définir et déterminer l'expression de l'interfrange  $i$ .

Les trous de rayon  $r = 10 \mu\text{m}$  sont espacés d'une distance de  $a = 50 \mu\text{m}$ .

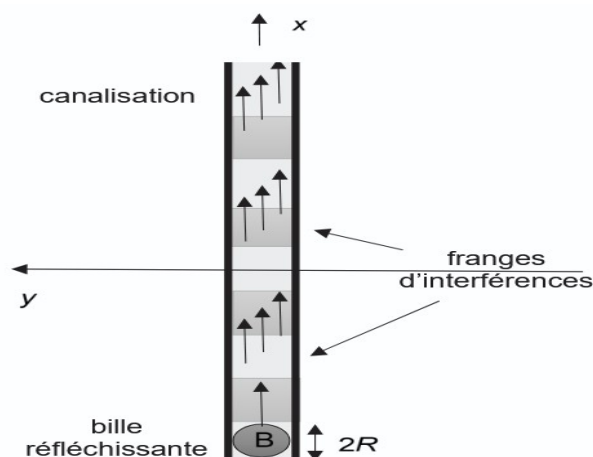
8- Sachant que le demi-angle de diffraction  $\theta$  est de l'ordre de  $\frac{\lambda_0}{2r}$ , déterminer le nombre de franges visibles sur l'écran.

Un fluide, dont on souhaite mesurer la vitesse, circule dans une canalisation transparente le long de l'axe  $F_2'x$ , perpendiculairement au système de franges (figure ci-dessous). On insère dans la canalisation une bille réfléchissante qui réfléchit une partie de la lumière sur un détecteur (non représenté ici). Ce détecteur enregistre ainsi une intensité  $I' = K I(B)$ , avec  $I(B)$  l'intensité lumineuse au niveau de la bille B.

La bille B se déplace avec le fluide à la vitesse constante  $\vec{v}_B = v \vec{u}_x$ . On admet que l'expression de l'interfrange reste la même malgré la présence du fluide.

9- À quelle condition sur le rayon R de la bille l'intensité reçue par le détecteur reflète-t-elle fidèlement la figure d'interférences ? On donnera une inégalité en fonction de l'interfrange  $i$ .

10- Déterminer l'expression de la position  $x_B(t)$  de la bille en fonction de  $v$ ,  $t$  et de sa position initiale  $x_0$ .

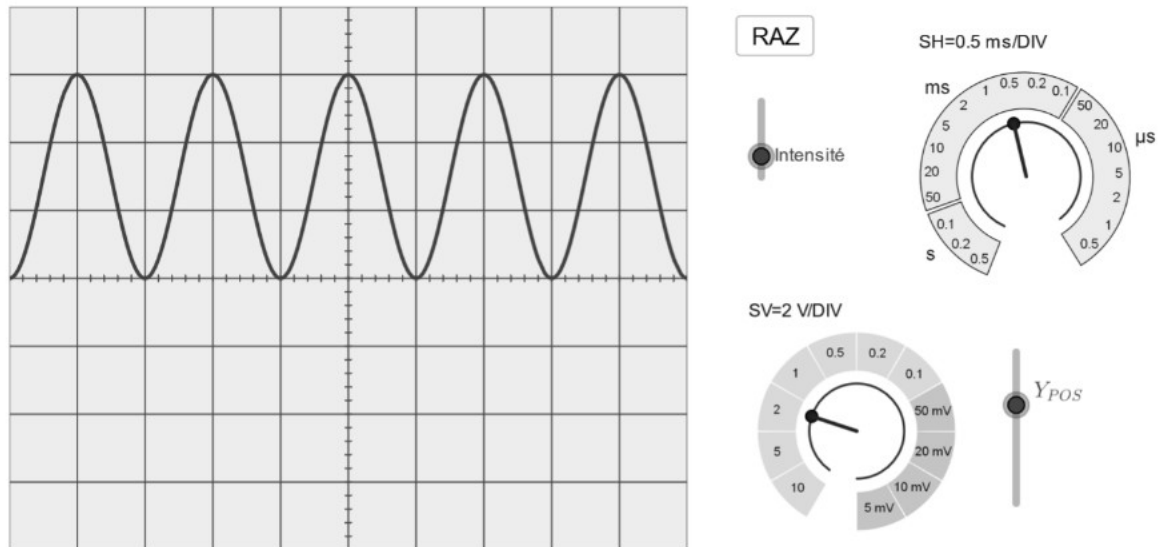


11- Montrer, à l'aide de la formule de Fresnel, que l'intensité reçue par le détecteur est de la forme :

$$I' = \frac{I_{\max}}{2} [1 + \cos(2\pi f t + \phi)] \quad \text{avec } I_{\max} \text{ l'intensité maximale enregistrée par le détecteur.}$$

On donnera l'expression de la fréquence  $f$  en fonction de  $v$  et de  $i$ .

Le signal enregistré par le détecteur est donné sur la figure ci-dessous :



12- À l'aide de l'oscillogramme et de l'expression de l'interfrange, déterminer la valeur numérique de la vitesse  $v$  de l'écoulement sachant que pour l'expérience  $\lambda_0 = 632 \text{ nm}$ ,  $a = 50 \text{ }\mu\text{m}$  et  $f_2' = 50 \text{ cm}$

On évalue la dispersion des mesures due à l'incertitude sur les valeurs de  $a$ ,  $f_2'$  et de  $f$  à l'aide de l'algorithme suivant :

```
f2=50e-2
a=50e-6
f=1000
lambda0=632e-9

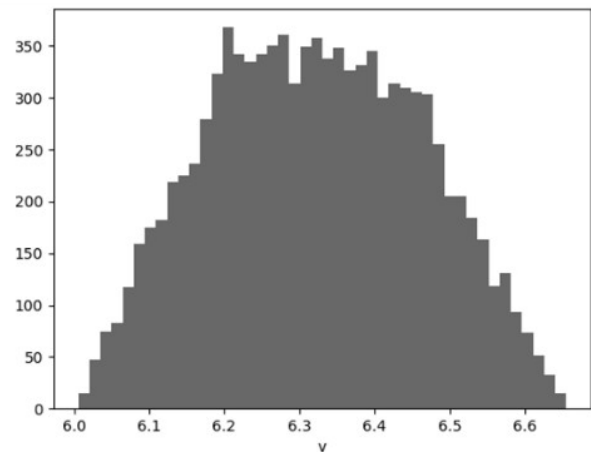
p_f2=0.5e-2*sqrt(3)
p_a=1e-6*sqrt(3)
p_f=0.6*sqrt(3)]

N=10000          #Nombre de tirage

v=[]

for i in range(N):
    f2_MC = f2+p_f2*rd.uniform(-1,1)
    a_MC = a+p_a*rd.uniform(-1,1)
    f_MC = f+p_f*rd.uniform(-1,1)
    v.append(lambda0*f2_MC*f_MC/a_MC)

print(round(np.std(v,ddof=1),3),' m/s') #Résultat
plt.hist(v,bins='rice') #Histogramme des valeurs
plt.xlabel('v')
plt.show()
```



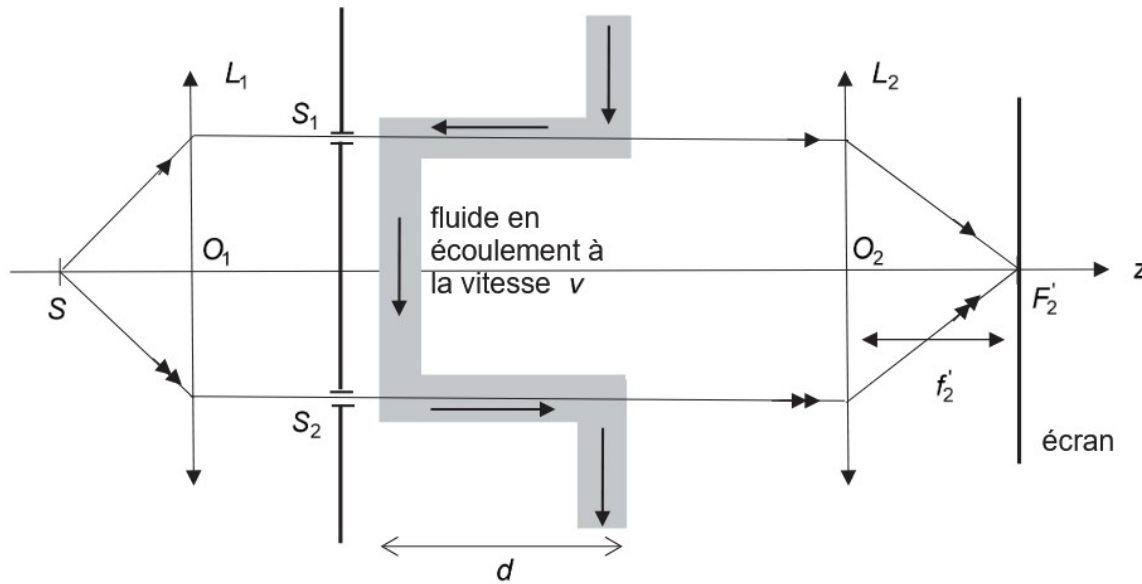
```
>>>
*** Remote Interpreter Reinitialized ***
0.142 m/s
```

- Algorithme python (à gauche) et résultat de l'exécution (à droite)

13- Quel nom porte un tel algorithme pour mesurer la dispersion d'une mesure ? Extraire du code les incertitudes-types associées à  $f_2'$ ,  $a$  et  $f$ , fréquence du signal électrique observé.

14- Donner le résultat de la vitesse du fluide  $v$  avec son incertitude-type associée  $u(v)$ . Commenter la dispersion des mesures.

En 1851, Fizeau avait mesuré la vitesse d'un fluide sans la contrainte de l'introduction de particules réfléchissantes. Son montage consistait à faire parcourir directement l'écoulement entre les trous et la lentille  $L_2$  (figure ci-dessous) et de mesurer le décalage de la figure d'interférences en  $F_2'$ .



On admet que la vitesse de la lumière suit la loi relativiste de composition des vitesses, c'est-à-dire que sa vitesse le long du trajet de distance  $d$  est :

$$\rightarrow \text{pour le rayon passant par } S_1 : v_1 = \frac{c}{n} \frac{1 - \frac{nv}{c}}{1 - \frac{v}{nc}}$$

$$\rightarrow \text{pour le rayon passant par } S_2 : v_2 = \frac{c}{n} \frac{1 + \frac{nv}{c}}{1 + \frac{v}{nc}}$$

avec  $n$  l'indice du fluide en écoulement,  $c$  la célérité de la lumière dans le vide et  $v$  la vitesse du fluide en écoulement ( $v \ll c$ ).

15- Montrer que la différence de temps de parcours pour atteindre  $F_2'$ , notée  $\Delta t = t_1 - t_2$ , entre les deux trajets, celui passant par  $S_1$  et celui passant par  $S_2$  s'écrit :  $\Delta t \approx \frac{2vd}{c^2}(n^2 - 1)$ .

16 - En déduire la différence de marche  $\delta(F_2')$ .

L'expérience réalisée par Fizeau consistait à observer les franges avec un fluide immobile, puis avec le fluide en mouvement.

17- Montrer que la variation de la différence de marche avec et sans écoulement s'écrit :

$$p_{\text{mobile}} - p_{\text{immobile}} = \frac{2vd}{\lambda_0 c}(n^2 - 1)$$

Le décalage des franges étant trop petit, Fizeau a doublé l'effet en renversant le sens de déplacement du fluide et a alors observé un décalage total d'un quart de frange.

18- En déduire la valeur de la vitesse de l'écoulement dans l'expérience de Fizeau dans laquelle les paramètres avaient pour valeur  $d = 1,5 \text{ m}$ ,  $n^2 - 1 \approx \frac{3}{4}$  et  $\lambda_0 = 540 \text{ nm}$ . L'ordre de grandeur de la vitesse obtenue est-il cohérent avec celui de l'expérience menée avec la bille réfléchissante ?

## Incertitude-type

L'incertitude-type  $u(Z)$ , associée à une grandeur  $Z$ , est reliée à la précision  $\Delta(Z)$  (ou demi-intervalle) par :

$$u(Z) = \frac{\Delta(Z)}{\sqrt{3}}$$

## Problème 2 : la couleur des plumes d'oiseaux .

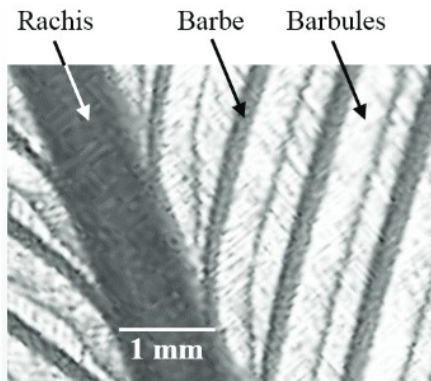


Figure B.1

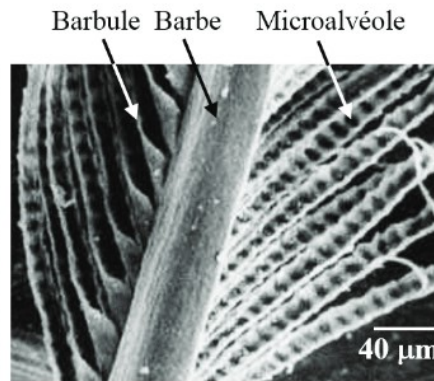


Figure B.2

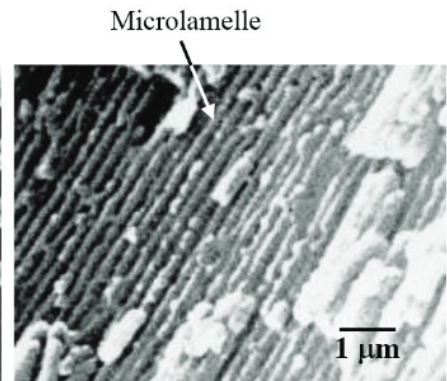


Figure B.3

### DOCUMENT (d'après les travaux du Professeur Maurice Pomarède, Ornithologue)

Les couleurs prises par les plumes d'oiseaux peuvent être classées en deux catégories : les couleurs pigmentaires et les couleurs structurales.

#### Les couleurs pigmentaires

Deux grandes familles de pigments produisent les couleurs des plumes : les caroténoïdes et les mélanines.

- Les **caroténoïdes** proviennent de l'alimentation et se retrouvent souvent à l'extrémité de la plume. Ils donnent des couleurs allant du rouge au rose très dilué et du jaune vif au crème en passant par le jaune pâle. Les éleveurs, en donnant une pâtée enrichie en un caroténoïde très actif (la *canthaxanthine*), peuvent, par exemple, faire passer les plumes de leurs canaris, d'une couleur terne au rouge vif.
- La **mélanine** est synthétisée par l'organisme. La mélanine, donne la couleur sombre (noire ou brune), ce qui est dû au fait que ce pigment absorbe une majorité des radiations lumineuses qu'il reçoit.

#### Les couleurs structurales

De part et d'autre du tube central (rachis) de la plume, s'étalent des réseaux très finement entrelacés dont seule l'observation microscopique révèle l'architecture régulière. Ces réseaux sont constitués de centaines de tigelles parallèles : les barbes. Chacune de ces barbes est elle-même une plume en miniature. Une barbe porte des centaines de petites barbules (figures B.1 et B.2, page 6).

Il n'y a pas de pigment bleu chez les oiseaux où pourtant cette couleur est bien répandue. Chez eux, le bleu est produit par diffraction, provoquée par des microstructures. Le bleu des oiseaux est une couleur structurale. Deux types principaux de microstructures s'observent chez les oiseaux.



## DOCUMENT (suite)

- Les **microgranules**, dont la taille est de l'ordre de quelques  $0,1 \mu\text{m}$  (comme celui des longueurs d'onde des radiations lumineuses), sont des grains situés dans des couches fines parallèles, transparentes et empilées (essentiellement pour les plumes de passereaux). Ces couches sont localisées dans les barbes des plumes. Ces microgranules diffractent les radiations de courte longueur d'onde et donc le bleu, alors que les autres radiations pénètrent dans la moelle des barbes où la mélanine noire les absorbe.
- Les **microlamelles** parallèles, régulièrement écartées, essentiellement gravées au fond de microalvéoles creusées en ligne à la surface des barbules, forment un réseau par réflexion et constituent le second type de microstructure (figures B.2 et B.3). Leur écartement est de l'ordre de quelques  $0,1 \mu\text{m}$  (comme celui des longueurs d'onde des radiations lumineuses). Chaque microlamelle diffracte donc la lumière en devenant une source secondaire. En revanche, lorsque les rayons lumineux parviennent entre deux microlamelles, ils sont absorbés par une couche de mélanine noire (figure B.4, page 7). Quand l'incidence de la lumière varie, la différence de chemin optique parcouru par les rayons lumineux, réfléchis par deux microlamelles voisines, varie aussi. Ainsi, en inclinant une plume du cou d'un canard dans un rayon de soleil, on peut voir un violet succéder à un vert clair. En revanche, un canard dépourvu de mélanine présente un plumage blanc.

L'espace est rapporté, en coordonnées cartésiennes, à un repère orthonormé direct ( $Ox, Oy, Oz$ ) de base  $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ . En plumage nuptial, le canard colvert mâle présente, au soleil, une tête parée de couleurs brillantes caractéristiques. Chacune des plumes du cou peut être considérée comme un réseau plan par réflexion, comportant un très grand nombre de traits parallèles, rectilignes, réfléchissants et espacés de manière régulière. L'espacement  $h$  est appelé le pas du réseau. Chaque microlamelle, assimilable à un trait fin, diffracte la lumière reçue dans toutes les directions vers le demi-espace traversé par la lumière incidente et les ondes réfléchies interfèrent (figure B.4).

L'étude du réseau par réflexion peut s'effectuer de façon identique à celle du réseau par transmission. Le réseau est éclairé par un faisceau parallèle de lumière blanche polychromatique (lumière solaire).  $i$  est l'angle d'incidence et  $\theta$  l'angle précisant la direction d'observation à l'infini après réflexion, ces angles étant définis algébriquement, relativement à la normale au réseau et dans le sens trigonométrique (figure B.5)

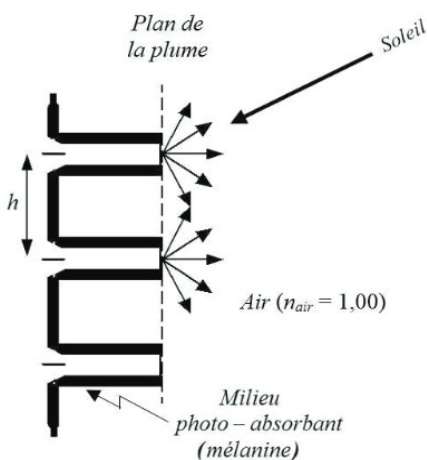


Figure B.4

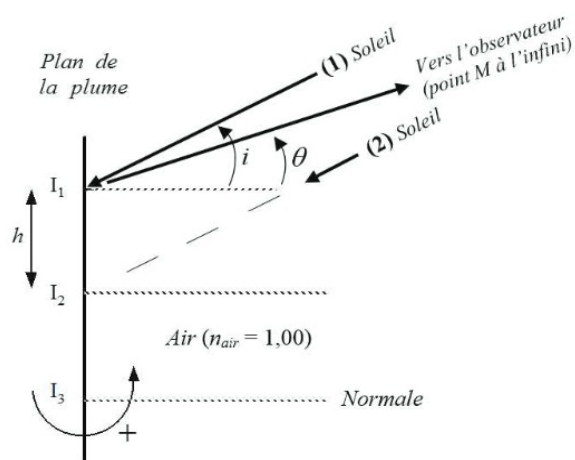


Figure B.5

### Données :

- Pas du réseau  $h = 570 \text{ nm}$  ;
- Spectre visible :  $\lambda \in [400 \text{ nm} ; 750 \text{ nm}]$  ;
- Couleurs et longueurs d'onde :

Couleur	Longueur d'onde $\lambda$ (nm)	Couleur	Longueur d'onde $\lambda$ (nm)
Infrarouge	750-1000	Vert-bleu	495-520
Rouge	625-750	Cyan	490-495
Orange	600-625	Bleu azur	465-490
Jaune	585-600	Bleu	440-465
Vert-jaune	575-585	Violet	400-440
Vert	520-575	Ultraviolet	300-400

1- Le soleil peut être considéré, en première approximation, comme une source lumineuse quasi-ponctuelle et infiniment éloignée. Quelle particularité géométrique présentent alors ses rayons qui arrivent à la surface de la Terre ?

2- Recopier sommairement la figure B.5 et la compléter en faisant apparaître clairement la différence de marche (ou de chemin optique)  $\delta_{2-1}(M)$  entre deux rayons (2) et (1) provenant du soleil et qui se réfléchissent, respectivement aux points  $I_2$  et  $I_1$ , sur deux traits adjacents (de la plume-réseau) vers un point M situé à l'infini (observateur éloigné), dans la direction définie par l'angle  $\theta$ .

3- Établir l'expression de cette différence de marche  $\delta_{2-1}(M)$  en fonction du pas  $h$  et des angles  $i$  et  $\theta$ .

4- En déduire la relation entre  $\theta_k$ ,  $i$ ,  $h$ ,  $\lambda$  et l'ordre  $k$  d'un maximum d'intensité, lié à des interférences constructives (formule du réseau par réflexion).

5- Une plume est éclairée sous incidence normale (angle  $i$  nul) par la lumière solaire et est soumise au phénomène de diffraction à l'infini.

a- Quelles sont, pour les radiations du visible, les valeurs possibles de l'ordre  $k$  des interférences constructives ?

b- Pour chacune de ces valeurs de  $k$ , indiquer le domaine de radiations qui bénéficie de ces interférences constructives ?

6- Le cou d'un colvert, considéré comme un cylindre d'axe Oz et de section circulaire uniforme, est éclairé par les rayons du soleil (figure B.6). Un observateur éloigné, qui tourne le dos au soleil, examine, en différents points P, les plumes tangentes à la surface cylindrique. Les rayons solaires incidents et les rayons reçus par l'œil du promeneur sont parallèles à l'axe Oy et appartiennent au plan xOy. Il s'agit de déterminer la couleur des plumes constatée par l'œil de l'observateur aux différents points P (tableau ci-dessous) définis par l'angle  $\widehat{POx}$  sur la figure B.6.

Point P	Angle $\widehat{POx}$ (degrés)	$i$ (degrés)	$\theta$ (degrés)
A	0	- 90	- 90
B	30	- 60	- 60
C	45	- 45	- 45
D	60	- 30	- 30

Recopier le tableau ci-dessous en le complétant.

Point P	$ k\lambda $	Ordre $k$	$\Lambda$ ( nm )	Couleur observée
A				
B				
C				
D				

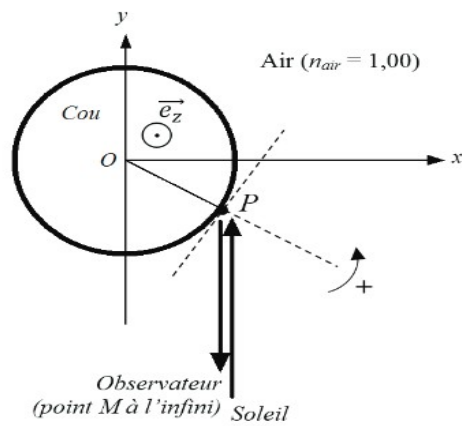


Figure B.6

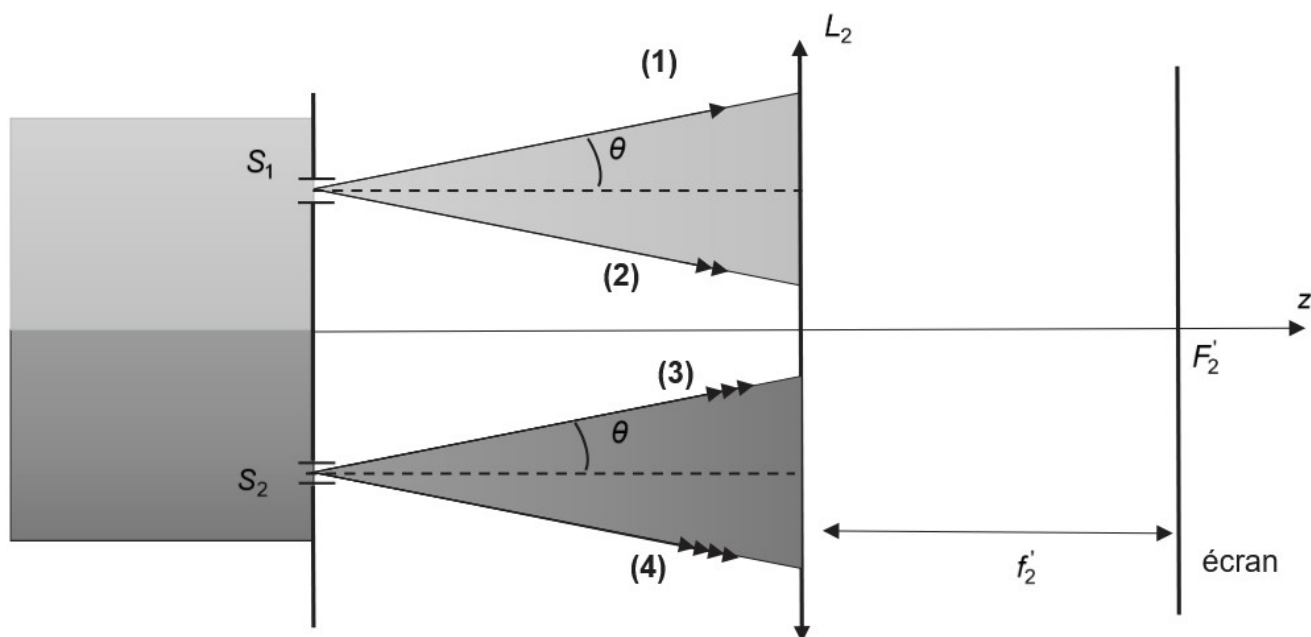
7- On cherche à déterminer les caractéristiques de l'intensité diffractée dans la direction  $\theta$  par N traits du réseau lorsqu'ils sont éclairés par une lumière monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  ( même configuration que pour la figure B.5 ) .

- a- Déterminer l'intensité diffractée  $I(\theta)$  par les N traits en fonction de  $I_0$  intensité produite par un trait, N,  $\sin \theta$  et  $\sin i$  .
- b- Déterminer l'expression de l'intensité maximale  $I_{max}$  et des valeurs de  $\sin \theta + \sin i$  pour lesquelles  $I(\theta)=0$  autour du maximum d'ordre k .
- c- Représenter l'allure de la courbe donnant l'intensité en fonction de  $\sin \theta + \sin i$  ( vous ferez figurer les grandeurs remarquables ) .



## Document réponse : problème 1

### → Questions 1 et 2



### → Questions 4 et 5

