

CONCOURS NATIONAL D'ADMISSION DANS LES GRANDES ECOLES D'INGENIEURS

(Concours national DEUG)

Epreuve commune à 2 options (Mathématiques et Physique)

PHYSIQUE - PARTIE II**Mercredi 18 mai : 10 h 15 - 12 h 15**

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

| |
|--|
| Les calculatrices sont autorisées |
|--|

L'usage de tout ouvrage de référence et de tout document est interdit.

Les parties A et B sont totalement indépendantes. Il est conseillé aux candidats de prendre connaissance rapidement de la totalité du texte du sujet.

Les candidats doivent respecter les notations de l'énoncé et préciser, dans chaque cas, la numérotation de la question posée.

OPTIQUE ONDULATOIRE

Partie A

Technique de photo-inscription d'un capteur FBG (réseau de Bragg sur fibre optique)

DOCUMENT (d'après le site Web « National Instruments »)

<http://www.ni.com/white-paper/11821/fr/>

Le capteur optique FBG (*Fiber Bragg Grating* ou réseau de Bragg sur fibre optique) est l'un des capteurs les plus utilisés industriellement. Ce dispositif (ou interface) transforme les variations de température et/ou de contrainte mécanique en variation de longueur d'onde de la lumière. Un transducteur permet ensuite de réaliser l'acquisition de données.

Le support du capteur est une fibre optique : fil de silice très fin qui transmet la lumière en son sein. Une fibre optique se compose de trois éléments essentiels : le cœur, la gaine et le fourreau de protection. La gaine réfléchit la lumière diffusée vers l'intérieur de la fibre, permettant ainsi sa propagation à travers le cœur avec un minimum de perte. Le fourreau extérieur sert à protéger la fibre de tout dommage physique.

Le capteur optique FBG réfléchit, parallèlement à l'axe, une radiation lumineuse dont la longueur d'onde fluctue avec les variations de température et/ou de contrainte mécanique. Les capteurs FBG sont fabriqués en utilisant les procédés interférentiels : un segment (quelques mm) de fibre photosensible est exposé à une distribution périodique d'intensité lumineuse, essentiellement UV. L'indice de réfraction de la fibre est modifié de façon permanente en fonction de l'intensité lumineuse à laquelle il est soumis. La perturbation périodique de l'indice de réfraction qui en résulte est appelée réseau de Bragg sur fibre (figure A.1).

Lorsqu'un faisceau lumineux à large spectre est envoyé dans une fibre FBG, les réflexions émises par le segment d'indice de réfraction alterné interfèrent de manière constructive uniquement pour la longueur d'onde λ_B particulière, appelée longueur d'onde de Bragg et définie par l'équation de Bragg : $\lambda_B = 2 n_c \times \Lambda$ (relation à admettre) dans laquelle n_c est l'indice de réfraction absolu du cœur de la fibre et Λ le pas du réseau. Le FBG réfléchit donc la radiation de longueur d'onde λ_B tout en transmettant les autres (figures A.2 et 3).

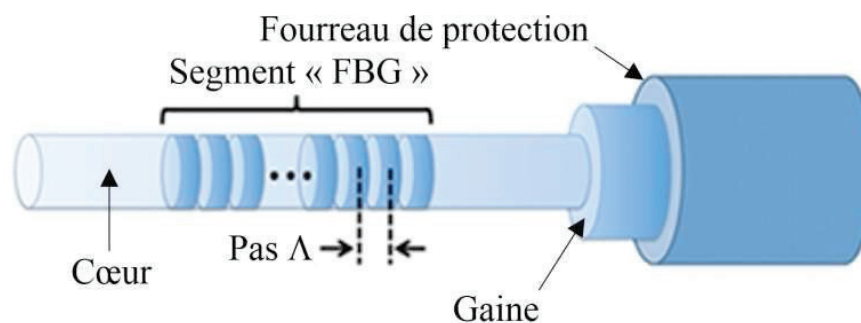
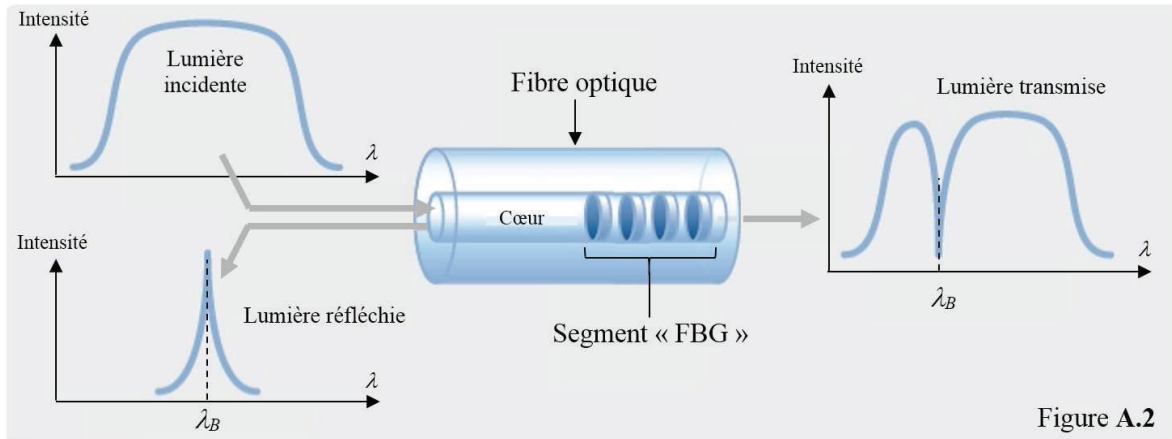


Figure A.1

DOCUMENT (suite)



Les variations de contrainte mécanique et de température affectent à la fois l'indice de réfraction absolu n_c et le pas du réseau Λ d'un FBG, ce qui se traduit par un décalage de la longueur d'onde λ_B réfléchie.

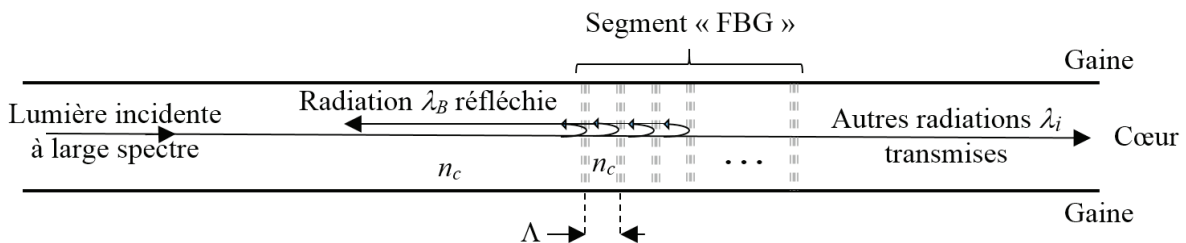


Figure A.3

Aucune connaissance spécifique au chapitre des « lames minces », hors programme dans ce Concours, n'est requise pour traiter ce problème.

Il est proposé, dans cet exercice, « de photo-inscrire » un réseau de Bragg directement à l'intérieur d'une fibre optique, par irradiation transverse interférométrique. Cette méthode consiste à placer la fibre, plus précisément une partie de la fibre dont on a retiré la gaine polymère de protection, dans un champ d'interférences UV réalisé avec un laser.

Le dispositif utilisé est un montage interférentiel appelé « miroir de Lloyd ». Les interférences sont ici obtenues en divisant le front d'onde du faisceau laser UV incident à l'aide d'un miroir plan. La fibre est placée perpendiculairement au miroir : elle est donc soumise au champ d'interférences. Le verre étant dopé (avec de l'oxyde de germanium, par exemple), une irradiation UV permet de modifier définitivement son indice de réfraction. La figure d'interférences est constituée de franges rectilignes régulièrement espacées ce qui permet d'introduire une modulation périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre.

L'espace est rapporté, en coordonnées cartésiennes, à un repère orthonormé direct (Ox, Oy, Oz) de base $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$.

La figure A.4 page 4, donne le schéma de principe de l'installation en représentation plane. La surface du miroir (\mathcal{M}) appartient au plan yOz . L'axe de la fibre est confondu avec l'axe Ox et les rayons UV, parallèles au plan xOz , présentent tous le même angle d'incidence θ avec le miroir.

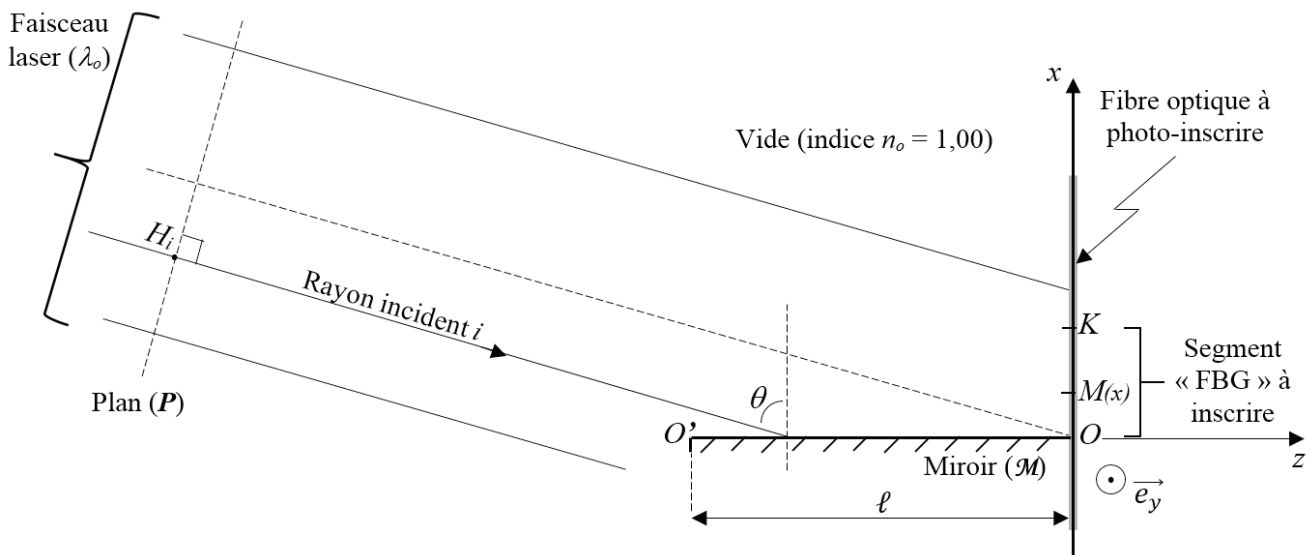


Figure A.4

Le faisceau laser est un faisceau lumineux quasi-monochromatique et cohérent du point de vue spatial et du point de vue temporel. La source utilisée est un laser à exciplexe UV (longueur d'onde λ_0) au fluorure d'argon ArF (notamment utilisé en chirurgie ophtalmique).

La réflexion, sur la surface du miroir, introduit un déphasage supplémentaire $\Delta\varphi = \pi$ et donc une augmentation de $\Delta\delta = \frac{\lambda_0}{2}$ du chemin optique du rayon réfléchi.

Le segment « FBG », de longueur $e = OK$, est destiné à réfléchir une certaine radiation de Bragg, de longueur d'onde λ_B .

1. La fibre optique est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractives de la lumière. Le confinement de l'onde à l'intérieur du cœur est assuré par les multiples réflexions à l'interface des deux matériaux cœur-gaine.
 - a) À quelle condition les indices absolus de réfraction (n_c pour le cœur et n_g pour la gaine) permettent-ils ces réflexions totales ?
 - b) Donner un ordre de grandeur numérique du diamètre Φ du cœur de la fibre.
2. Quelle est la principale caractéristique de la phase $\varphi(H_i)$ de chacun des points H_i du plan (P) (figure A.4), orthogonal aux rayons incidents laser ?
3. Deux rayons lumineux issus du faisceau laser interfèrent au point $M(x)$ de l'axe Ox . Le premier, noté (1) parvient en M directement sans déviation. Le second, noté (2), parvient en ce même point M , mais après une réflexion sur le miroir, conformément aux lois de Descartes.
 - a) Recopier sommairement le schéma de la figure A.4 et le compléter avec le tracé des deux rayons (1) et (2).
 - b) Même question pour les deux rayons de même type qui interfèrent au point K , limite supérieure du champ d'interférences, avec $OK = e$ (longueur du segment « FBG » à photo-inscrire au sein de la fibre).
 - c) En déduire la relation entre la longueur e , l'angle d'incidence θ et la longueur $\ell = O'O$ du miroir.
 - d) Sans oublier le déphasage lié à la réflexion, déterminer, en fonction des données de l'énoncé, l'expression de la différence de marche (ou différence de chemins optiques) $\delta_{2-1}(M) = \delta_{2-1}(x)$ entre les deux rayons (1) et (2) qui interfèrent au point $M(x)$.

4. Les franges d'interférences sont parallèles à l'axe Oy . Au point $M(x)$ de l'axe Ox , les interférences sont destructives (frange noire) si la différence de marche $\delta_{2-1}(M)$ entre les deux rayons qui interfèrent est un multiple impair de demi-longueurs d'onde $\frac{\lambda_0}{2}$.
- En déduire la différence de marche $\delta(O)$ au point O ($x = 0$ m). La frange d'interférences est-elle brillante ou noire en O (frange d'ordre $p = 0$) ?
 - Exprimer, en fonction de p , λ_0 et θ , l'ordonnée x_p de la frange noire d'ordre p .
 - En déduire l'expression de l'interfrange i sur la figure d'interférences, en fonction de λ_0 et θ .
5. *Application numérique* : $\lambda_B = 1,55 \times 10^{-6}$ m ; $\lambda_0 = 1,93 \times 10^{-7}$ m ;
 $n_c = 1,50$; $n_o = 1,00$; $e = 5,00 \times 10^{-3}$ m.
- Calculer le pas Λ nécessaire, dans le segment « FBG » au cœur de la fibre, à la réflexion de la radiation de longueur d'onde λ_B .
 - Sachant que l'interfrange i est nécessairement identique à Λ , calculer l'angle d'incidence θ .
 - En déduire la longueur $\ell = O'O$ du miroir.
 - Calculer le nombre N de franges brillantes, donc de fines couches photosensibles irradiées et dont l'indice local a définitivement été modifié.
 - Ce capteur optique est soumis à une contrainte extérieure non précisée ici, qui modifie les caractéristiques du segment « FBG » : augmentation relative du pas Λ du réseau de 10^{-2} et baisse relative de l'indice n_c de 2×10^{-2} . Calculer la variation $\Delta\lambda_B$ de la longueur d'onde de Bragg λ_B .

Partie B

La couleur des plumes d'oiseaux

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 tiges 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 barbules 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 barbules 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.

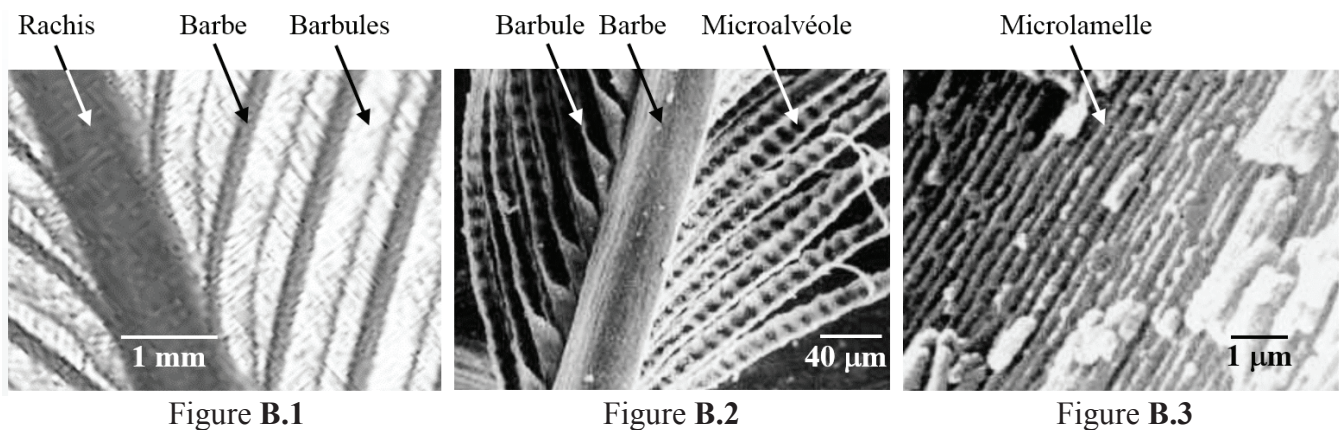


Figure B.1

Figure B.2

Figure B.3

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**, page 7).

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 θ 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**, page 7).

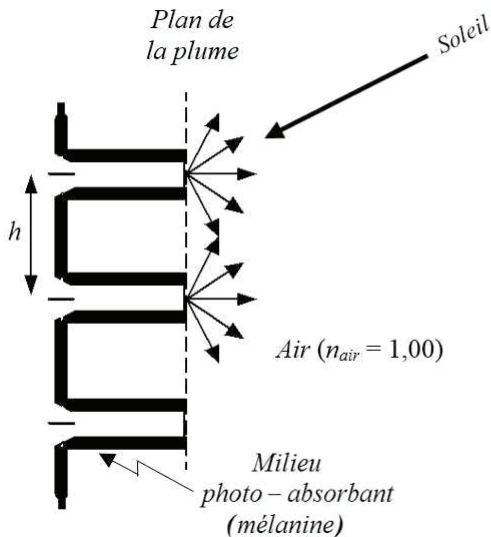


Figure B.4

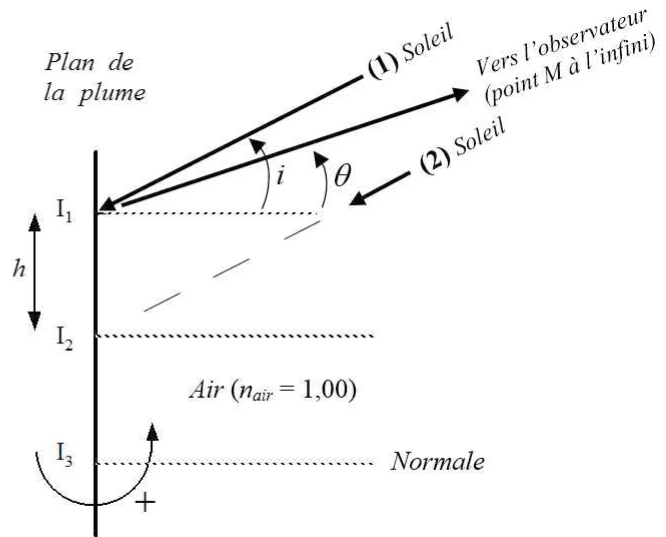


Figure B.5

Données :

- $-1 \leq \sin x \leq +1$;
- 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 λ (nm) | Couleur | Longueur d'onde λ (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-punctuelle 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 θ .
3. Établir l'expression de cette différence de marche $\delta_{2-1}(M)$ en fonction du pas h et des angles i et θ .
4. En déduire la relation entre θ_k , i , h , λ 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.
- Quelles sont, pour les radiations du visible, les valeurs possibles de l'ordre k des interférences constructives ?
 - 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 tangentées 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 B.1) définis par l'angle \widehat{POx} sur la figure B.6.

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

Tableau B.1

Recopier le tableau B.2 ci-dessous en le complétant.

| Point P | $\left \frac{k\lambda}{h} \right $ | Ordre $ k $ | λ (nm) | Couleur observée |
|-----------|-------------------------------------|-------------|----------------|------------------|
| A | | | | |
| B | | | | |
| C | | | | |
| D | | | | |

Tableau B.2

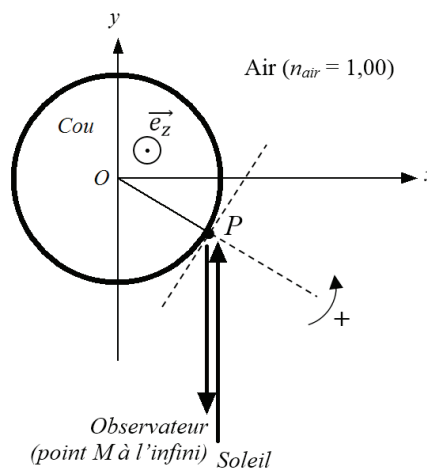


Figure B.6

Fin de l'énoncé