

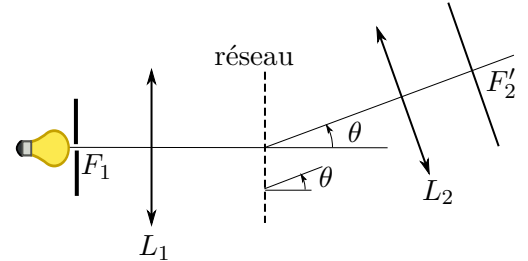
DEVOIR N° 4

Le jeudi 17 septembre

Quelques limitations des réseaux

Petit problème « maison »

On utilise un réseau pour produire le spectre d'une source lumineuse et mesurer les longueurs d'onde observées. Pour cela, la source est placée derrière une étroite fente au foyer objet F_1 d'un collimateur représenté par la lentille L_1 . Le plan du réseau est orthogonal à l'axe optique de L_1 et ses traits sont perpendiculaires au plan de la figure. Chacune de ces N « fentes », éloignée d'une distance d de ses premières voisines, diffracte la lumière. Une direction quelconque de diffraction vers l'infini est repérée par l'angle θ qu'elle forme avec l'axe optique de L_1 . L'observation se fait dans le plan focal d'une lentille de projection L_2 . L'axe optique de L_2 peut être orienté de manière à recueillir à son foyer des faisceaux définis par un angle θ élevé ; cet angle ne sera donc pas supposé petit dans les calculs.



Pouvoir de résolution intrinsèque

1. Tracer sur un schéma 3 rayons de la source et jusqu'à l'écran, diffractés dans la même direction θ .
2. Exprimer en fonction de d et θ la différence de marche δ entre deux rayons diffractés par deux traits successifs du réseau et parvenant au même point de l'écran.
3. Pour une longueur d'onde λ donnée, caractériser en le justifiant les directions θ pour lesquelles la lumière est particulièrement intense.
4. Pour simplifier, on suppose N pair. On considère une direction θ telle que la différence de marche exprimée à la question 3 pour deux traits successifs, vérifie $\delta = p\lambda + \lambda/N$ avec $p \in \mathbb{Z}$. Que vaut dans ce cas la différence de marche δ' entre les ondes émises par deux traits distants de $Nd/2$ (c'est à dire entre un trait d'indice i et un autre d'indice $i + N/2$) ? Que vaut l'ordre associé p' ? En déduire que, dans cette direction, l'intensité lumineuse diffractée par l'ensemble du réseau est nulle.
5. De combien varie $\sin \theta$ lorsqu'on passe de l'une des directions définies dans la question 3 à la direction la plus proche de la question 4 ? On notera $\Delta(\sin \theta)$ la variation cherchée.
6. On considère ici que la source émet un doublet, c'est à dire deux longueurs d'onde très proches λ_1 et $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$. Définir précisément le pouvoir de résolution théorique du spectroscopie à réseau. En utilisant le critère de Rayleigh et les questions précédentes, le déterminer dans un ordre p donné.
7. Application numérique : pour $N = 2000$, peut-on résoudre dans l'ordre un le doublet jaune ($\lambda = 600 \text{ nm}$) d'une lampe au sodium ($\Delta\lambda = 0,6 \text{ nm}$) et celui d'une lampe au mercure ($\Delta\lambda = 2,0 \text{ nm}$) ?

Effet de la largeur de la fente source

En pratique, la fente source placée en F_1 n'est pas infiniment fine, elle s'étend entre deux points A et B symétriques par rapport à l'axe optique (figure 1). On note $2a$ sa largeur dans la direction orthogonale à l'axe optique. À cause de cette largeur, la raie observée dans le plan focal de L_2 pour une longueur d'onde donnée et un ordre donné s'étend sur une certaine largeur. Si deux longueurs d'onde sont trop proches, les raies se chevauchent et on ne peut plus les résoudre.

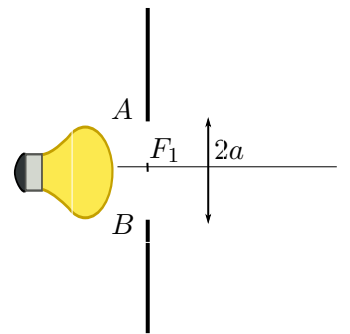


FIGURE 1 – Fente élargie

8. Représenter sur une figure le cheminement vers L_1 puis jusqu'au réseau de plusieurs rayons issus de A d'une part, et de plusieurs rayons issus de B d'autre part. Exprimer en fonction de a et f'_1 les valeurs extrêmes $i_1 > 0$ et $-i_1$ de l'angle d'incidence i sur le réseau. L'angle i_1 est supposé petit.
9. Que deviennent pour des rayons inclinés d'un angle i les résultats des questions 3 et 4 ?
10. En raison de l'étendue de la fente source, l'angle i prend toutes les valeurs autour de zéro entre les bornes $-i_1$ et i_1 déterminées dans la question 8. Pour un ordre p donné et λ donné, déterminer le demi-intervalle de variation de $\sin \theta$, noté $\Delta'(\sin \theta)$, sur lequel s'étale la lumière autour de la direction définie dans la question 3.

11. On suppose N infini. À quelle condition évite-t-on le chevauchement des raies associées à deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 ? AN : Peut-on résoudre dans l'ordre 1 le doublet jaune du sodium et celui du mercure ? On donne $f'_1 = 10 \text{ cm}$, $2a = 0,1 \text{ mm}$ et $1/d = 600 \text{ mm}^{-1}$.

Problème des raies fantômes (partie plus difficile)

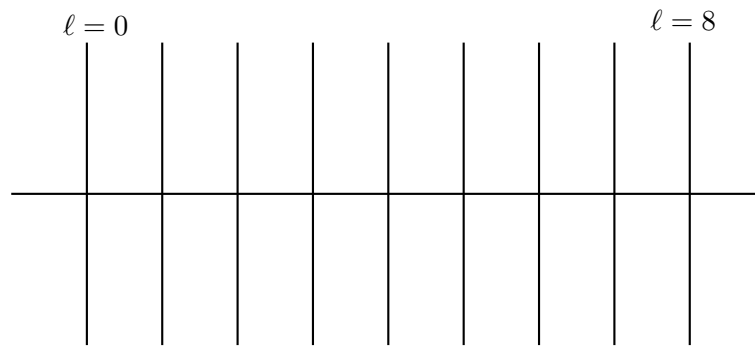
Certains réseaux plans présentent à l'issue de leur fabrication des défauts affectant la position des traits, qui ne sont alors pas régulièrement espacés comme ils devraient l'être dans un réseau parfait. On s'intéresse ici à un défaut de positionnement se répétant périodiquement. En observant le spectre produit par le réseau, on relève la présence, de part et d'autre de chaque raie attendue, de deux raies parasites peu intenses souvent appelées « raies fantômes ». Ces raies fantômes constituent un obstacle à une bonne observation du spectre, puisqu'on risque de les attribuer par erreur à des longueurs d'onde inexistantes.

Dans les questions qui suivent, on interprète les raies fantômes et on établit des résultats théoriques concernant leur intensité et leur position. On se place en incidence normale ($i = 0$).

12. Le réseau parfait possédant un pas d , ses traits se situent aux abscisses $0, d, 2d$, etc, $x_\ell = \ell d$ avec $\ell \in \{0, 1, 2, \dots, (N-1)\}$. Dans le réseau réel affecté du défaut périodique, les traits ont pour abscisses

$$x'_\ell = x_\ell + \epsilon d \sin\left(\frac{2\pi\ell}{Q}\right) \quad , \quad \epsilon < 1 \quad \text{et} \quad Q \in \mathbb{N}^* \quad .$$

Que représente Q ? Pour $Q = 8$, faire un dessin représentant les 9 premiers traits idéaux en noir, comme ci-dessous, et les 9 traits réels associés en couleur. On prendra pour ce dessin $\epsilon = 0,4$.



13. Le réseau est éclairé en incidence normale. Que vaut le déphasage φ'_ℓ entre l'onde diffractée à l'infini par le trait d'indice ℓ , et celle diffractée par le trait d'indice 0 ?

14. On note $s_0(\theta, t) = Ae^{j(\psi_0(M) - \omega t)}$ l'onde émise par le trait d'indice $\ell = 0$ au point M repéré par la direction θ . En introduisant les φ'_ℓ , exprimer sous forme de somme le scalaire optique dans la direction θ , sans chercher à simplifier.

15. La suite des calculs suppose que la modification des déphasages due au défaut, par rapport à la situation idéale dans défaut, est « très faible » pour tout ℓ . À quelle condition, portant sur ϵ , cela est-il le cas ? On répondra par une inégalité forte sur ϵ .

16. Sous l'hypothèse de la question précédente, un calcul non demandé donne

$$\exp(j\varphi'_\ell) \simeq \exp\left(\frac{2j\ell\pi d \sin\theta}{\lambda}\right) + \frac{\epsilon d\pi \sin\theta}{\lambda} \exp\left(2j\ell\pi \left(\frac{d \sin\theta}{\lambda} + \frac{1}{Q}\right)\right) + \frac{\epsilon d\pi \sin\theta}{\lambda} \exp\left(2j\ell\pi \left(\frac{d \sin\theta}{\lambda} - \frac{1}{Q}\right)\right)$$

À partir de cette expression, justifier que le maximum de lumière d'ordre p (défini à la question 4) est entouré de deux autres maximums (ce sont les raies fantômes). Donner les deux valeurs de $\sin\theta$ définissant la direction de ces nouveaux maximums.

17. Quel est le rapport d'intensité $I_{\text{fant}}/I_{\text{vraie}}$ des raies fantômes par rapport aux raies véritables ? Dans cette expression, on remplacera $\sin\theta$ par sa valeur dans l'ordre p en l'absence de défaut (ce qui est une approximation).

18. Un expérimentateur ignorant du défaut considère par erreur que la raie fantôme est une raie réelle à la longueur d'onde $\lambda' = \lambda \pm \Delta\lambda$, alors qu'il s'agit en réalité d'une raie fantôme à la longueur d'onde λ . Quelle est l'expression de $\Delta\lambda$?

19. A.N. : pour $P = 400$, $\epsilon = 0,01$ et $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, calculer $\Delta\lambda$ et $I_{\text{fant}}/I_{\text{vraie}}$ dans l'ordre 1. Le problème de raies fantômes vous paraît-il plus gênant ou moins gênant que celui lié au pouvoir de résolution intrinsèque (questions 6 et 7) ?

Interférométrie radar

Concours E3A

Ce problème étudie l'interférométrie radar par satellite, technique qui permet de suivre des déformations de la croûte terrestre par imagerie spatiale.

I Préliminaire

Considérons le dispositif usuel des trous d'Young (figure 2) : une source S ponctuelle, monochromatique de longueur d'onde λ , éclaire une plaque opaque (P) percée de deux trous fins S_1 et S_2 symétriques par rapport à O' et distants de B . L'écran (E) est placé en O à la distance D de (P). L'axe (Ox) est vertical et parallèle à S_1S_2 . Tout point M de l'espace est repéré par ses coordonnées (x, y, z) . La distance B ainsi que $|x|$, $|y|$ et $|z|$ sont très petites devant D . Chaque trou fournit le même éclairement noté $\mathcal{E}_0$.

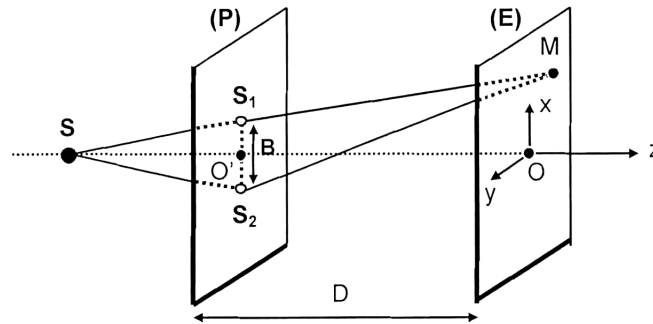


FIGURE 2 – dispositif des trous d'Young

1. Étudier et représenter la figure d'interférence observée sur l'écran en précisant toutes ses caractéristiques. On expliquera les phénomènes mis en jeu et on démontrera les résultats intermédiaires.

2. L'écran (E) est maintenant incliné d'un angle β par rapport à la verticale (Ox) par rotation autour (Oy) (partie gauche de la figure 3). En limitant les calculs au premier ordre, justifier que le déphasage en $M(x, y, z)$ (avec maintenant $z \neq 0$) n'est pas modifié par l'inclinaison de l'écran.

3. Pour plus de commodité, on procède à un changement de coordonnées (voir figure 3). Un point M de l'écran est repéré par une nouvelle abscisse x' ($\vec{u}'_x$ est dans le plan de l'écran, incliné d'un angle β par rapport à $\vec{u}_x$) et par l'ordonnée y . La coordonnée z' (dans la direction orthogonale à $\vec{u}'_x$) est nulle pour les points de l'écran. Décrire la figure d'interférence et calculer l'interfrange.

Pour la suite, il est utile de remarquer que le produit $B \cos \beta$ qui apparaît dans ces calculs représente la longueur de la projection de $\overline{S_1S_2}$ sur $\vec{u}'_x$, c'est à dire sur le plan de l'écran.

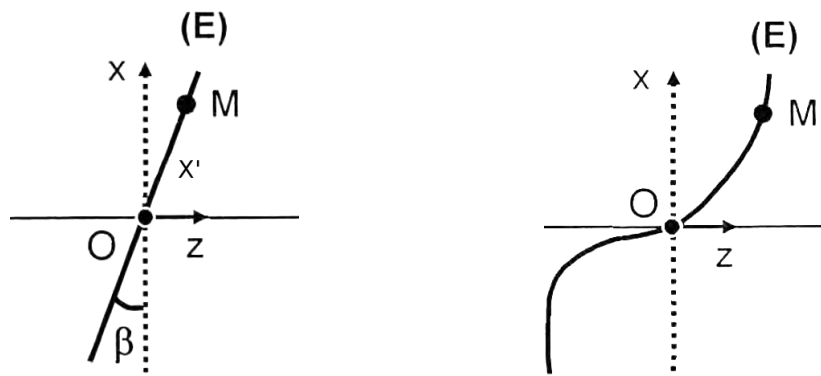


FIGURE 3 – Écran incliné (à gauche) et courbé (à droite)

4. L'écran (E) n'est désormais plus plan mais présente des variations locales de courbure dans le plan (Oxz), tout en restant invariant par translation le long de (Oy) (partie droite de la figure 3). Extrapoler les résultats précédents pour décrire et représenter la figure d'interférence.

II Interférométrie

Le radar est un système actif qui repose sur l'émission et la réception de faisceaux d'ondes électromagnétiques après rétrodiffusion par un point P du sol (figure 4). Après traitement des signaux, on peut reconstituer une image numérique de la surface du sol. À chaque pixel de cette image est associée une phase ou un déphasage des signaux radars, après émission et rétrodiffusion par le point P correspondant à ce pixel de l'image. On note $d = SP$ la distance du satellite au point P du sol et λ_R la longueur d'onde radar. L'air est assimilé au vide.

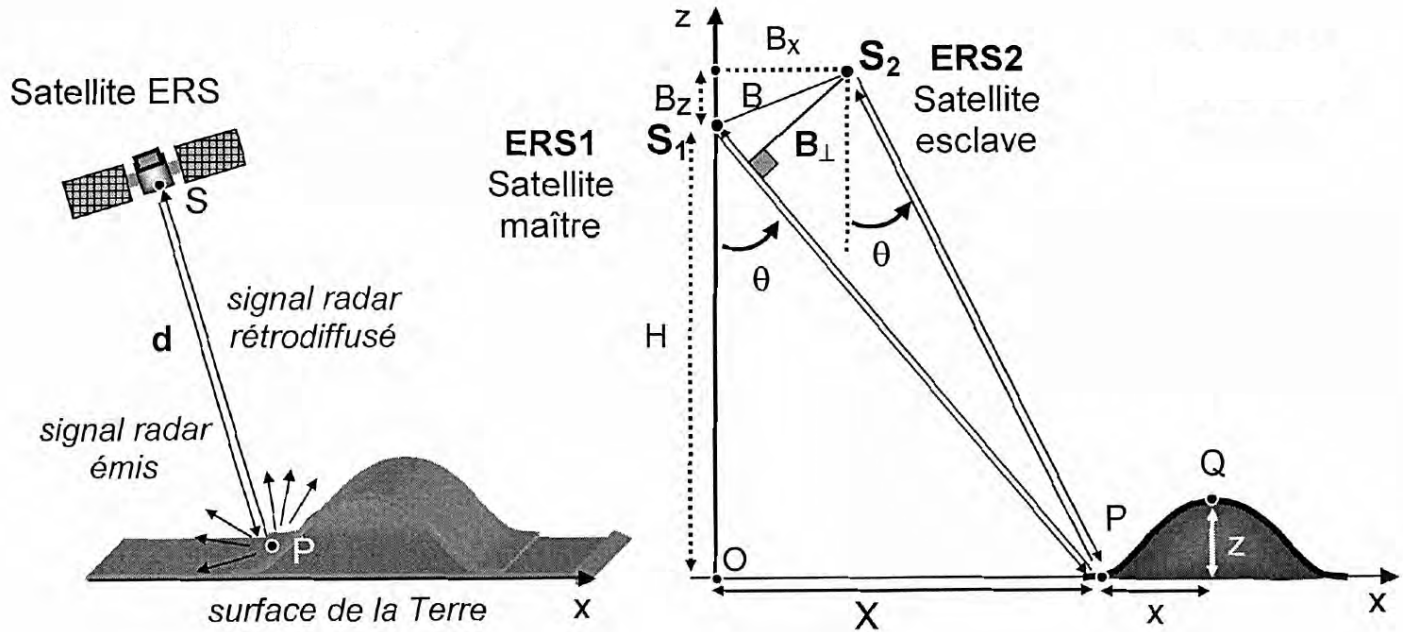


FIGURE 4

Données numériques : fréquence $\nu_R = 5,3$ GHz, longueur d'onde $\lambda_R = 5,7$ cm, $H = 785$ km, $\theta = 23^\circ$, $B_\perp = 400$ m, $X = 5,0$ km.

1. La réflexion sur le sol est la cause d'un déphasage propre φ_{propre} . Exprimer le déphasage φ_S total lié à la propagation du signal de S jusqu'à S après rétrodiffusion en P .

L'interférométrie radar est fondée sur l'utilisation d'un couple d'images radar acquises simultanément sur une même zone et sous des incidences très proches par deux satellites ERS1 et ERS2 (European Remote Sensing) de l'Agence Spatiale Européenne¹. La première image acquise est appelée image maîtresse et la seconde image esclave. L'image finale est obtenue en exploitant la différence de phase entre ces deux images de la même zone. Contrairement à ce qui se passe dans un système interférentiel usuel, les deux ondes produites par ERS1 et ERS2 ne se combinent pas directement sur un écran. On obtient ici un interférogramme en construisant point par point une grandeur analogue à une intensité lumineuse, à partir de la différence de déphasage existant, pour chaque pixel, entre l'image maîtresse et l'image esclave. Lorsque le déphasage φ_{propre} est uniforme, on peut en déduire les reliefs du sol. On note $\vec{B} = \vec{S_1S_2} = B_x \vec{u}_x + B_z \vec{u}_z$ et pose $B_\perp = B_z \sin \theta + B_x \cos \theta$ la projection de ce vecteur sur la direction orthogonale à $\vec{S_1P}$.

2. En supposant φ_{propre} uniforme, établir le lien entre $\Delta\varphi_{12} = \varphi_{S_2} - \varphi_{S_1}$ et l'écart de distance $D_{12} = S_2P - S_1P$.

3. De combien se modifie D_{12} en passant d'une frange donnée à la frange voisine sur l'interférogramme ? Quel est l'importance pratique de cette valeur numérique du point de vue de la précision dans l'étude du terrain ?

On étudie plus spécifiquement la topographie autour d'un point P particulier repéré par l'abscisse X . Un autre point Q du sol est repéré par les déplacements x et z depuis P (voir figure 4) et on analyse la modification du déphasage $\Delta\varphi_{12}$ entre P et Q :

$$\delta\varphi = \Delta\varphi_{12}(P) - \Delta\varphi_{12}(Q) \quad .$$

4. Exprimer $\delta\varphi$ en fonction de λ_R et des distances S_2P , S_1P , S_2Q et S_1Q .

1. ESA bulletin 83

5. Exprimer $\delta\varphi$ en fonction de λ_R , X , H , B_x , B_z , x et z .

6. Des calculs non demandés² permettent d'obtenir

$$\delta\varphi \approx \frac{4\pi}{\lambda_R} \frac{B_{\perp}(x \cos \theta + z \sin \theta)}{\sqrt{X^2 + H^2}}.$$

Établir une analogie entre ce résultat et ceux de la partie I en précisant quel facteurs tenaient un rôle analogue à $B_{\perp}$, $(x \cos \theta + z \sin \theta)$ et $\sqrt{X^2 + H^2}$ respectivement.

7. L'interférogramme représente le plan du sol (Pxy) par une image en niveaux de gris, avec une intensité $I(x, y)$ analogue à ce que produiraient des interférences entre deux ondes présentant le déphasage $\delta\varphi$. Pour un sol plat, sans relief, quel serait l'aspect de la figure d'interférence obtenue? Préciser ses caractéristiques (A.N. attendue).

8. Un pixel numérique correspond sur le terrain à un carré de 20 m. Cela est-il compatible une bonne observation de la figure d'interférences?

9. On considère maintenant un sol présentant du relief. L'altitude z n'est pas uniforme mais dépend des coordonnées x et y du point Q . Quel est, en fonction de z , le déplacement selon (Ox) d'une frange d'ordre p donné par rapport au terrain plat?

10. Inversement, en un point donné de l'image de coordonnées (x, y) , quelle variation d'ordre Δp par rapport au terrain plat l'altitude z entraîne-elle?

11. On a simulé sur la figure 5 deux interférogrammes d'une même portion du sol et l'un d'eux correspond à une « montagne gaussienne » (en forme de cloche). Quelle est la longueur sur le terrain de la région étudiée? Quelle est l'élévation de cette montagne par rapport au sol plat qui l'entoure?

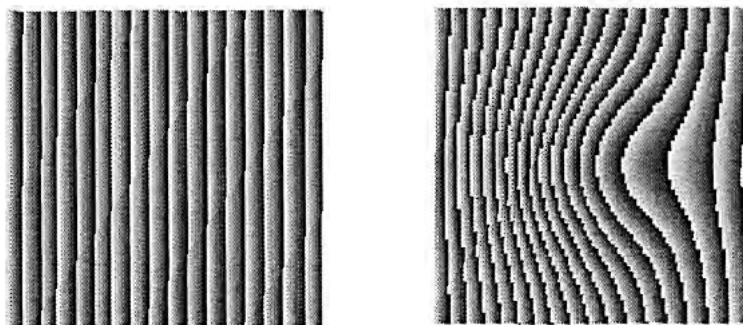


FIGURE 5 – Exemples d'interférogrammes

2. faisant intervenir des développements limités au second ordre particulièrement pénibles!

Arc-en-ciel

Adapté de CCINP et École Polytechnique

Un arc-en-ciel est constitué d'une série d'arcs lumineux, dont le centre est situé sur le prolongement de la ligne qui va du soleil à l'œil de l'observateur, l'un et l'autre étant donc considérés ici comme ponctuels. Ce phénomène est principalement dû à la réfraction de la lumière solaire dans les gouttes d'eau, dont le rayon dans l'atmosphère va de 0,1 mm à 2,5 mm, avec une moyenne de 0,5 mm. Le rayon des gouttelettes dans un nuage ou dans la brume est d'environ 0,01 mm. Toutes ces gouttes peuvent produire des arcs-en-ciel, mais seules les plus grosses d'entre elles donneront un phénomène aux couleurs vives. En-dessous d'une taille de 0,2 mm, la partie rouge de l'arc disparaît. Les gouttes très petites produisent des phénomènes de diffraction importants dont les effets se combinent à ceux de la réfraction.

Pour une composante monochromatique de l'éclairement, de longueur d'onde λ , on note $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$. L'indice de l'eau est noté n , l'indice de l'air vaut 1. On ne tiendra pas compte des diverses pertes et atténuations qui se produisent aux interfaces et pendant la propagation.

Partie A. Théorie géométrique de l'arc-en-ciel

On considère une goutte d'eau sphérique, de rayon a de diamètre $D = 2a$. Le trajet d'un rayon lumineux issu du soleil et parvenant jusqu'à l'œil d'un observateur est représenté sur la figure (6), dans laquelle les échelles ne sont évidemment pas respectées : le soleil se trouve à l'infini et l'observateur à quelques kilomètres de la goutte.

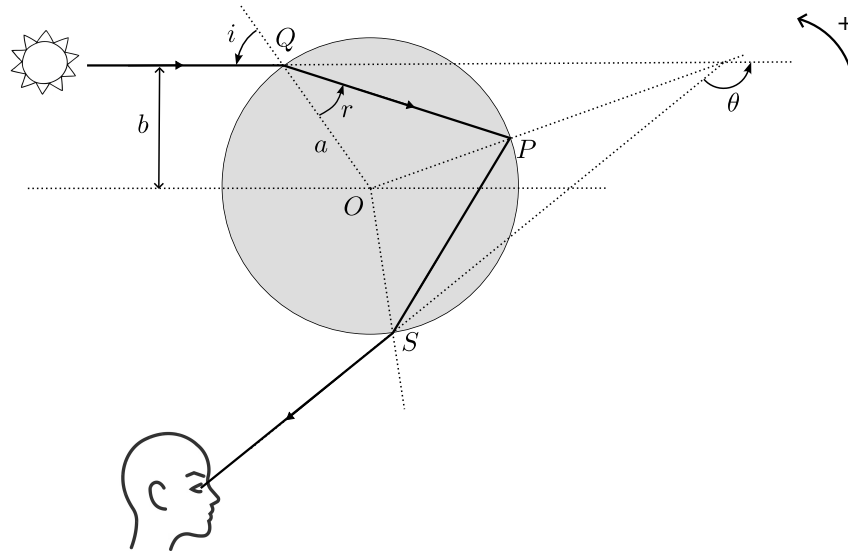


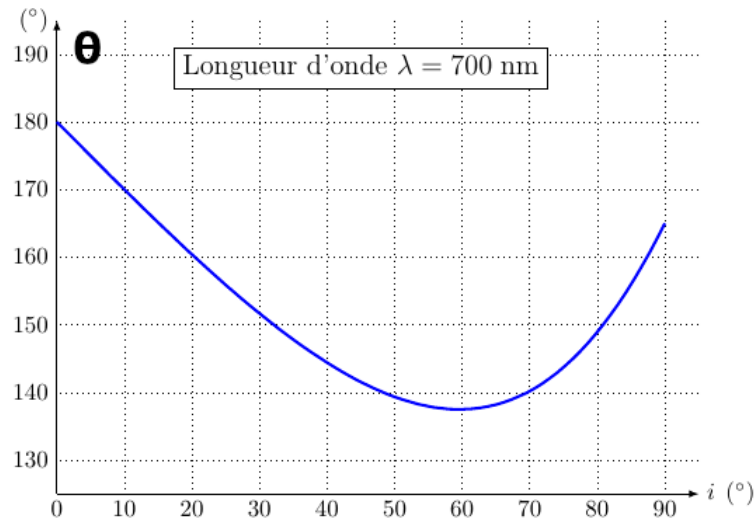
FIGURE 6 – Trajet d'un rayon dans une goutte sphérique

1. Rappeler les lois de Descartes puis écrire la relation entre i et r . Pourquoi peut-on se contenter d'un dessin bidimensionnel ?
2. On appelle « déviation » l'angle θ que forment le rayon incident et le rayon émergent. Afin d'avoir une valeur positive, on l'oriente comme l'indique la figure. En utilisant la figure (10) du document réponse, montrer avec clarté que $\theta = \pi - 4r + 2i$.
3. On pose $y = \sin i$. Exprimer θ en fonction de y puis calculer $d\theta/dy$. On rappelle que la dérivée de la fonction $x \mapsto \arcsin x$ est $x \mapsto 1/\sqrt{1-x^2}$.
4. Montrer que θ passe par un extremum lorsque

$$y = y_m = \sqrt{\frac{4-n^2}{3}}$$

puis exprimer la déviation extrême correspondante θ_m en fonction de n . Dans la suite, l'incidence correspondante est notée i_m et le rayon associé appelé *rayon critique*.

5. La lumière issue du soleil illumine toute une face de la goutte de manière uniforme. La figure (7) montre les variations de θ en fonction de i pour une valeur particulière de n . En utilisant cette figure, justifier qu'il se produit

FIGURE 7 – Variation de la déviation θ en fonction de l'angle d'incidence i .

une accumulation (ou une concentration) de lumière émergente dans la direction critique θ_m . Vous utiliserez la reproduction de la figure sur le document-réponse.

6. Pour le bleu ($\lambda = 400$ nm, $n = 1,343$) puis pour le rouge ($\lambda = 700$ nm, $n = 1,330$), calculer θ_m et $\varphi_m = \pi - \theta_m$. On exprimera ces angles en degrés.

7. Pour observer l'arc-en-ciel, l'observateur se place dos au soleil comme le montre la figure (12) du document-réponse. Il observe à une distance de quelques kilomètres une zone pluvieuse de l'atmosphère et voit briller les gouttes produisant l'accumulation de lumière évoquée à la question 5. Sur la figure (12), tracer les rayons émergents rouges et bleus dans la direction θ_m et faire apparaître l'arc-en-ciel. L'observateur observe-t-il le rouge à l'intérieur ou à l'extérieur de l'arc ?

Partie B. Théorie ondulatoire de l'arc-en-ciel (due à Young)

Il est possible d'observer dans un arc-en-ciel, outre les arcs décrits par l'optique géométrique, des arcs supplémentaires (dits « surnuméraires ») résultant d'un phénomène d'interférences (figure 8).

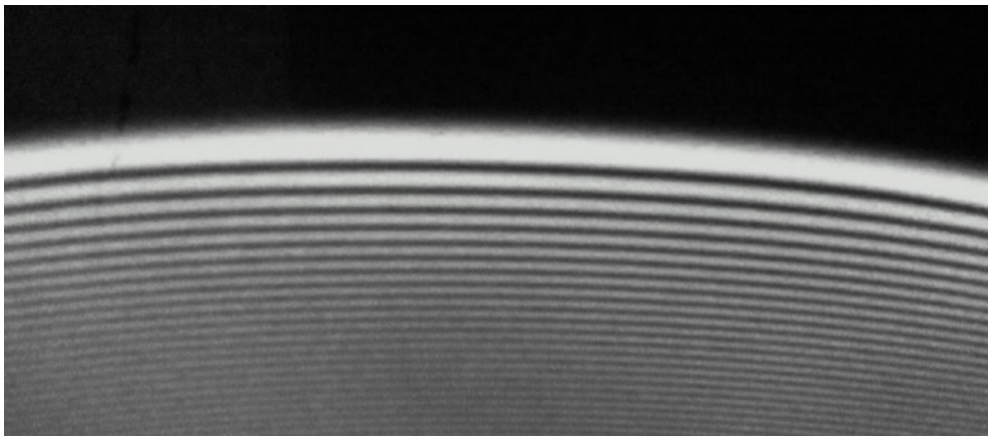


FIGURE 8 – Photographie d'arcs surnuméraires

8. Commençons par rappeler certaines conditions d'observation des interférences lumineuses. Pour cela, on s'éloigne momentanément du contexte de l'arc-en-ciel et on considère une situation plus générale. Deux sources lumineuses ponctuelles S_1 et S_2 émettent deux ondes lumineuses de pulsations respectives ω_1 et ω_2 . Ces deux ondes se propagent dans un milieu d'indice n et interfèrent en un point M après avoir parcouru les distances $x_1 = S_1M$ et $x_2 = S_2M$. On modélise les amplitudes des ondes en M par les grandeurs scalaires :

$$s_1(M, t) = a_1 \cos(\omega_1 t - k_1 x_1) \quad s_2(M, t) = a_2 \cos(\omega_2 t - k_2 x_2) \quad .$$

avec $k_i = n_i \omega_i / c$ ($i = 1$ ou $i = 2$) et où a_1 , a_2 sont des constantes, c la célérité de la lumière dans le vide.

- Donner un ordre de grandeur de ω_1 et ω_2 pour la lumière visible.
- L'intensité lumineuse $I(M)$ observée à l'œil nu en M est proportionnelle à la valeur moyenne du carré de l'amplitude reçue en M , soit : $I(M) = K \langle s^2(M, t) \rangle_\tau$. Sur quelle durée τ cette valeur moyenne est-elle calculée ?
- Calculer l'intensité $I(M)$ et montrer qu'elle s'exprime par

$$I(M) = I_1(M) + I_2(M) + I_{12}(M).$$

À quelle(s) condition(s) le terme I_{12} est-il non nul ?

- Lorsque ces conditions sont réunies, exprimer I_{12} en fonction de I_1 , I_2 , λ et d'une grandeur $\delta(M)$ exprimée en fonction de x_1 , x_2 et n .
- Représenter la courbe des variations de I en fonction de δ . Dans le cas de l'arc-en-ciel, que peut-on dire de I_1 et I_2 en observant la figure (8) ?

On considère deux rayons d'incidences $i_1 = i_m - \delta i$ et $i_2 = i_m + \delta i$ très voisines de l'incidence critique i_m , rencontrant la goutte à des « hauteurs » $b_m - \delta b$ et $b_m + \delta b$ (figure 9). Au voisinage de l'extremum en i_m , θ présente une dépendance quadratique par rapport à $(y - y_m)$ et à $(i - i_m)$, de sorte que ces deux rayons émergent avec la même déviation θ , c'est à dire parallèlement l'un à l'autre (mais pas parallèlement au rayon d'incidence i_m). De plus, au second ordre près en δi , ils se réfléchissent au même point P .

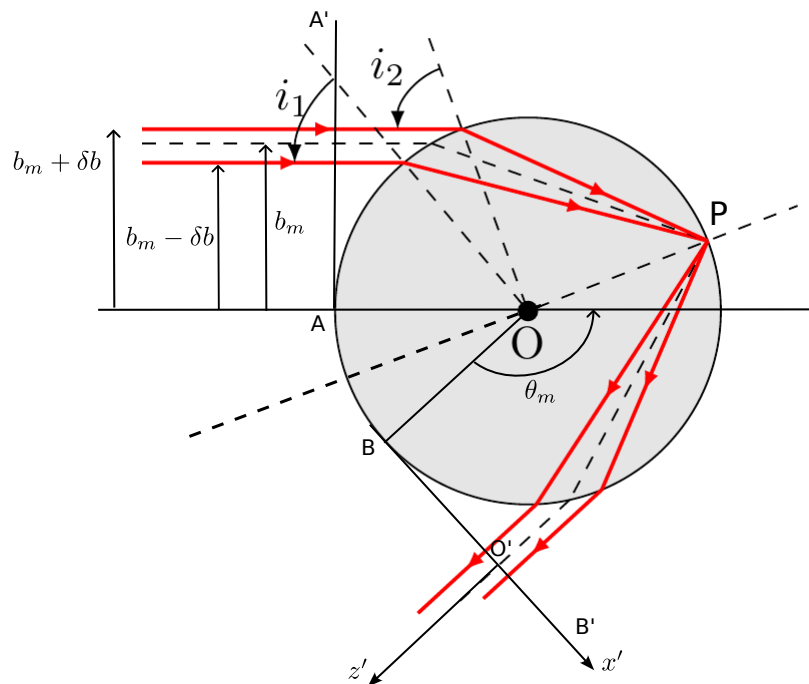


FIGURE 9 – Deux rayons d'incidences i_1 et i_2 très voisines de i_m et symétriques par rapport à i_m , émergeant parallèlement l'un à l'autre. Le rayon d'incidence i_m est tracé en pointillés et l'angle i_m n'est pas indiqué pour ne pas surcharger la figure.

9. Où ces deux rayons émergents interfèrent-ils ? Montrer soigneusement en utilisant un schéma que leur différence de marche s'exprime par

$$\delta = D(\cos i_1 - \cos i_2) + 2nD(\cos r_2 - \cos r_1)$$

où r_1 et r_2 sont les angles de réfraction associés à i_1 et i_2 . On pourra exploiter la symétrie de la situation et montrer que la moitié de cette différence de marche s'établit entre l'infini et l'arrivée en P .

10. Exprimer la condition d'interférences constructives. L'écart entre les franges est-il plus grand pour les grosses gouttes ou pour les petites ? Justifier qualitativement. Les rayons incidents d'angles d'incidence $i_1 = 50,13^\circ$ et $i_2 = 67,98^\circ$ donnent pour une radiation rouge ($\lambda = 700 \text{ nm}$, $n = 1,330$) des rayons émergents parallèles. Quel diamètre de goutte permettra d'observer la frange claire d'ordre 2 dans la direction des rayons émergents ?

La suite du problème original consiste en une étude détaillée de l'onde formée après leur passage dans la goutte par les rayons d'incidences voisines de i_m . Elle est extrêmement difficile !

Document réponse à rendre avec la copie

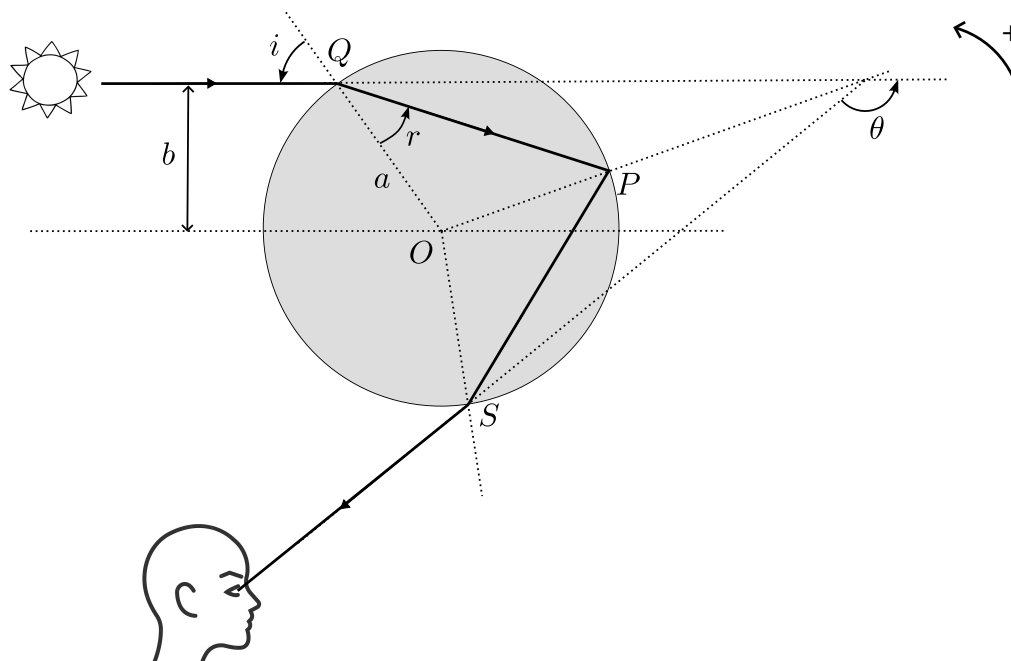
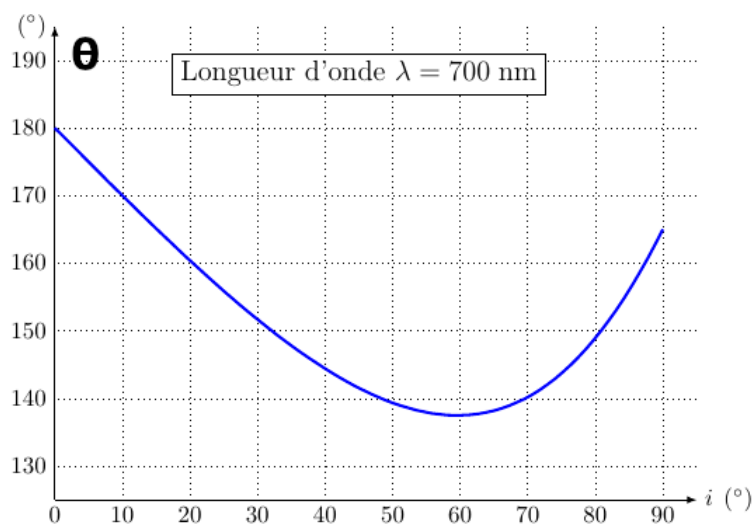


FIGURE 10 – Trajet d'un rayon dans une goutte sphérique

FIGURE 11 – Variation de la déviation θ en fonction de l'angle d'incidence i .

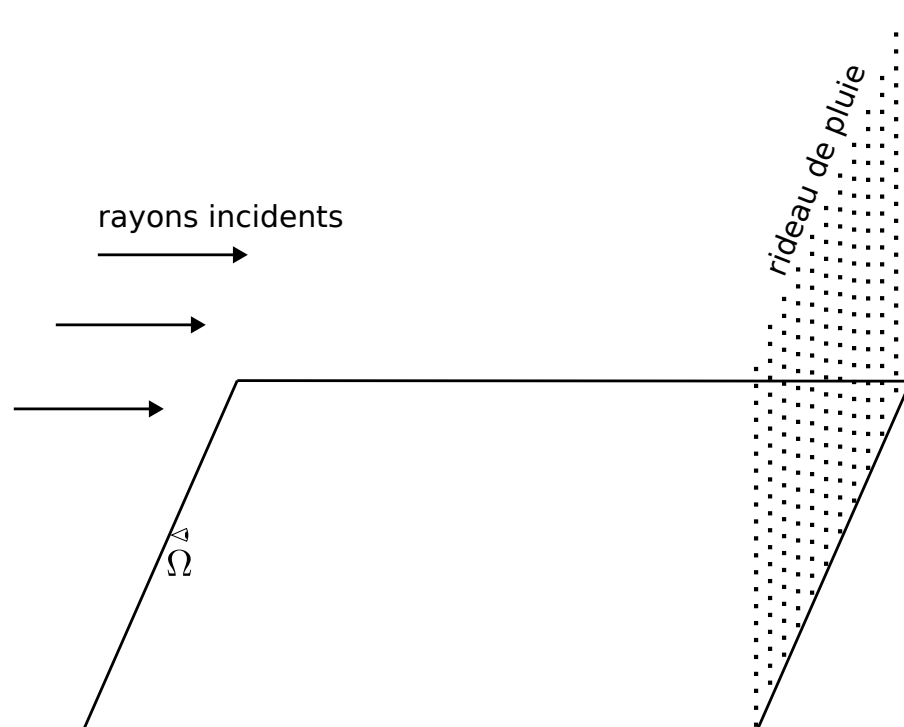


FIGURE 12 – Œil ponctuel situé en Ω observant un rideau de pluie éclairé par le soleil