

## CONTROLE TERMINAL – SESSSION 1

Durée : 2h 00 min

*Pas de documents, pas de téléphone portable ou montre connectée. Calculatrice autorisée  
prenez soin de justifier vos réponses et de respecter les notations employées (le soin pourra aussi être pris en compte)*

NOM / Prénom : *Monteiro Jنتين*

### Problème : Les reflets dans la nature

23 points

Ce problème volontairement assez long est noté sur 23, ce qui vous laisse la possibilité de ne pas traiter un certain nombre de questions ou d'avoir quelques erreurs.

### Partie 1 : La lumière du soleil

3,75 points

chapters de cours associés : 1, 6, 7

Dans ce problème, nous allons principalement nous intéresser à un éclairage en lumière naturelle, i.e. ayant les propriétés spectrales de la lumière solaire. Nous considérerons principalement le domaine du visible, qui s'étend de  $\lambda_1 = 380$  à  $\lambda_2 = 780$  nm. Si besoin, la valeur de la vitesse de lumière dans le vide est notée  $c$  et sera prise égale à  $3 \cdot 10^8$  m/s.

**P1.1)** Comment s'appellent les domaines spectraux voisins du visible ?

0.25 pt

Longueurs d'onde inférieures à 380 nm : *ultra violet*

Longueurs d'ondes supérieures à 780 nm : *infrarouge*

**P1.2)** Calculez la largeur spectrale  $\Delta\nu$  exprimée en THz entre  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ .

1 pt

$\Delta\nu =$  \_\_\_\_\_  $=$  \_\_\_\_\_ THz  
*expression analytique      valeur numérique*

**P1.3)** A quelles couleurs correspondent ces différentes longueurs d'onde ?

0.5 pt

400 nm =

530 nm =

630 nm =

**P1.4)** La lumière naturelle est-elle polarisée ? (*cochez la bonne réponse*)

0.25 pt

*oui*

*non*

**P1.5)** Est-ce que l'image fournie à travers un système optique par un éclairage naturel filtré par un filtre spectral étroit est identique à l'image d'un objet éclairé par un faisceau laser de la même couleur ? Pourquoi ? Quelle est la quantité physique à impliquer ? (*cochez la bonne réponse*)

0.5 pt

*oui*

*non*

*Justification :*

*Quantité à utiliser :*

P1.6) L'œil humain est sensible à (cochez la ou les bonnes réponses)

- la phase de l'onde électro-magnétique
- la polarisation lumineuse
- l'intensité de l'onde

P1.7) Rappelez la définition du vecteur de Poynting. Quelle est sa signification ? 0,5 pt

P1.8) Que signifie avoir deux ondes qui sont cohérentes entre elles ? 0,5 pt

**Partie 2 : Les reflets sur un film de savon** (inspiré sujet Bac métropole 2021) : **6,25 points**

chapitres de cours associé : 2 et 3

Nous considérons dans ce premier exemple un film de savon plan représenté Figure 1 et dont l'épaisseur notée  $e$  est de  $1 \mu\text{m}$ . Il est éclairé par un faisceau lumineux collimaté en incidence normale. Néanmoins, pour la clarté du schéma, nous lui avons donné un léger angle qui sera dans les calculs négligé. Nous prendrons ici pour l'indice de l'eau  $n_e = 4/3$  et comme indice de l'air  $n_0 = 1$ . Nous négligerons ici les phénomènes de dispersion (l'indice ne changera donc pas en fonction de la longueur d'onde en première approximation). Nous considérons dans un premier temps que le film est parfaitement plan.

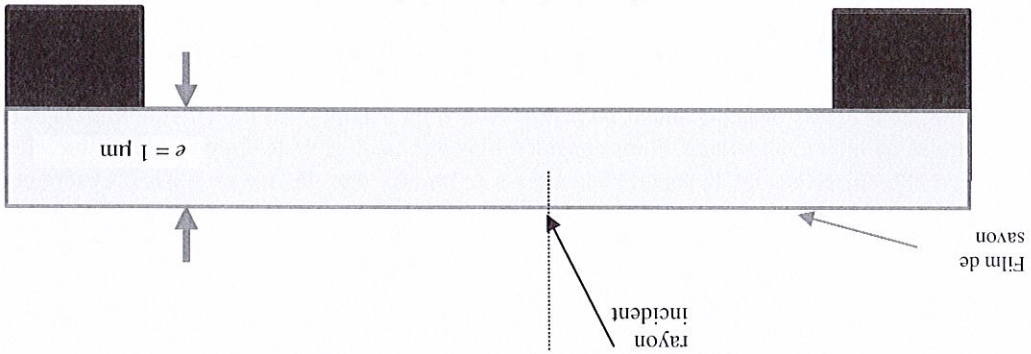


Figure 1 : Film de savon étudié

P2.1) Donnez l'expression des coefficients de réflexion  $r_1$  et de transmission  $t_1$  en amplitude et en incidence normale pour l'interface air vers eau. Faites de même pour l'interface eau vers air avec  $r_2$  et  $t_2$ . Vous donnerez également les valeurs numériques. 1 pt

$$r_1 =$$

$$t_1 =$$

$$r_2 =$$

$$t_2 =$$

P2.2) Complétez la figure 1 pour faire qualitativement apparaître les trois premiers rayons réfléchis. 0,5 pt

**P2.3)** Exprimez la différence de marche  $\delta$  entre deux ondes réfléchies successives pour une longueur d'onde  $\lambda$ . 0.5 pt

$\delta =$	$=$
<i>expression analytique</i>	<i>valeur numérique</i>

**P2.4)** Soit  $\psi_0$  l'amplitude complexe du rayon incident sur la lame mince d'eau savonneuse. Donner l'expression de l'amplitude des trois premières ondes réfléchies  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  et  $\psi_3$ . Quelles conclusions et approximations raisonnables peuvent en être tirées (nous les supposons vérifiées dans la suite) ? 1 pt

$\psi_1 =$
$\psi_2 =$
$\psi_3 =$
Conclusion et approximations :

**P2.5)** Exprimez l'intensité résultante  $I$  pour une longueur d'onde incidente  $\lambda$  en fonction de  $e$  et  $n_e$ .? 0.5 pt

$I =$
-------

**P2.6)** Quelles longueurs d'onde du visible qui vont disparaître du spectre lumineux réfléchi ? 1 pt

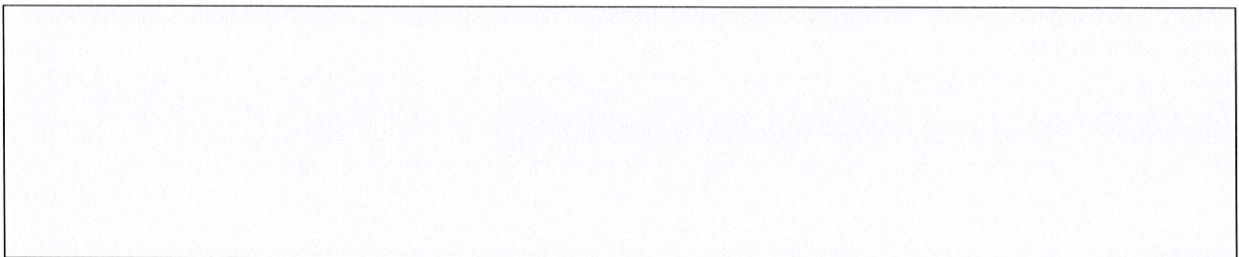
$\lambda =$	$=$
<i>expression analytique</i>	<i>valeurs numériques</i>

**P2.7)** Quel paramètre permet de calculer l'écart entre deux cannelures sombres ? Donnez son nom, son expression et sa valeur en THz. 1 pt

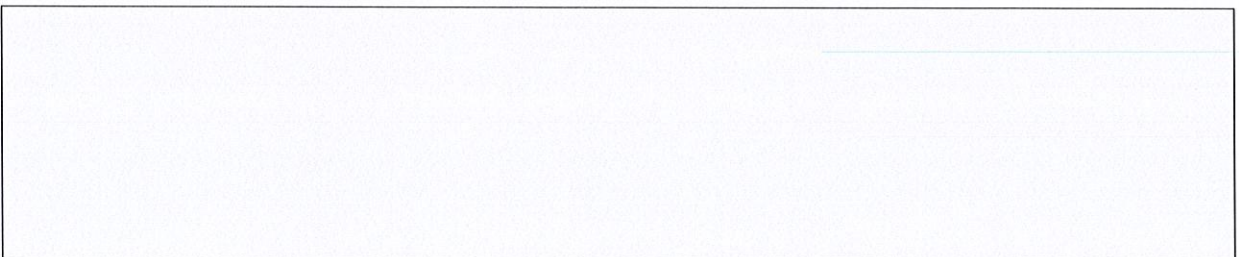
*Le paramètre donnant l'écart entre deux cannelures sombres est :*

???? =	$=$
<i>expression analytique</i>	<i>valeur numérique en THz</i>

**P2.8)** Quel est l'aspect visuel du film de savon supposé ici d'épaisseur égale et éclairé en lumière blanche ? 0,25 pt



**P2.9)** En réalité, le film n'est pas d'épaisseur égale. Sous l'action de la gravité, il est légèrement bombé vers le bas et son épaisseur est plus large au centre que sur les côtés. Comment cela va-t-il influencer sur son aspect visuel ? 0,5 pt



**Partie 3 : Les reflets colorés des ailes de Morpho** <sup>1 2</sup>

**Partie 3A : Une structure couche mince**

chapitre de cours associé : 2

Le morpho **male** est un magnifique papillon avec une couleur très intense dans le bleu. Les ailes de ce papillon comportent deux types d'écailles : des écailles de fond présentant une structure répétitive de petites lamelles de chitine parallèles les unes aux autres formant un réseau, et au-dessus de ces écailles de fond on trouve de fines écailles de recouvrement transparentes qui forment un réseau de pas  $\lambda$ . La chitine <sup>3</sup> est un matériau transparent d'indice  $n$  proche de 1,5.

La surface de chaque écaille est constituée de crêtes, formées de couches successives, séparées d'une distance de l'ordre de la centaine de nanomètres.

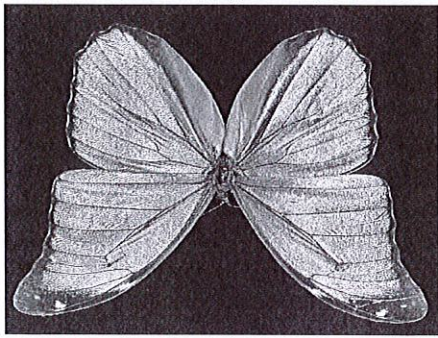


Figure 2 : Photographie d'un morpho

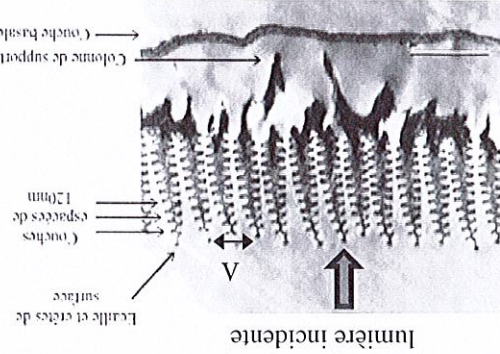
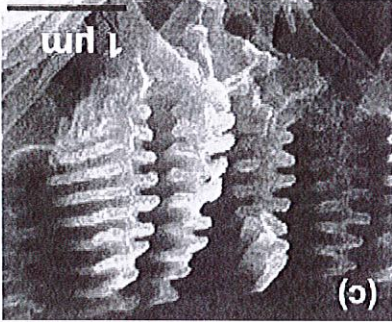


Figure 3 : Photographie au microscope électronique des écailles de chitine et des détails des crêtes de chaque écaille <sup>4</sup>. Modèle simplifié des couches formant les crêtes.



<sup>1</sup> <https://passion-entomologie.fr/couleur-bleu-morpho-origine-structurelle/>  
<sup>2</sup> <https://ice.ac-montpellier.fr/ABCDORGA/Famille10/PAPILLONS.htm>  
<sup>3</sup> <https://fr.wikipedia.org/wiki/Chitine>  
<sup>4</sup> Extrait de Vukusic, P., Sambles, J. R., Lawrence, C. R., & Wootton, R. J. (1999). Quantified interference and diffraction in single Morpho butterfly scales. Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 266(1427), 1403-1411.

**4,5 points**

En première approximation, nous allons considérer que ces couches successives qui forment les crêtes se comportent comme des couches minces. Nous allons donc considérer une superposition de couches minces, d'indice  $n$  et d'épaisseur  $80 \text{ nm}$  séparées de couches d'air de  $120 \text{ nm}$ . On considère un substrat d'indice également  $n$  et un milieu incident qui est de l'air.

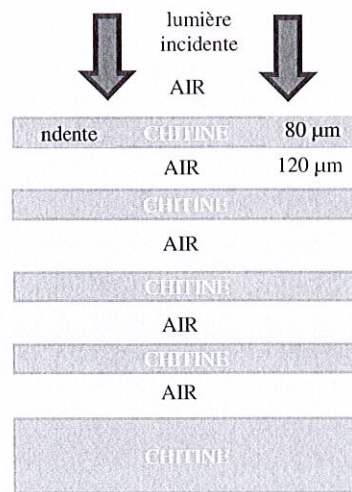


Figure 4 : Modèle simplifié des crêtes des écailles

**P3A.1)** Comment peuvent être qualifiées ces couches lorsqu'on considère une lumière à  $480 \text{ nm}$  ? 0.25 pt

On rappelle que les champs électrique et magnétique au niveau de l'interface I d'une couche mince peuvent être exprimés à partir des champs de sortie à l'interface II de cette couche mince 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

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

avec  $k_0 = 2\pi / \lambda$ ,  $h$  la différence de marche optique entre les deux interfaces considérées et  $Y_C$  l'admittance de la couche mince donnée par la situation étudiée par :

$$Y_C = Y_0 n_C \cos(\theta),$$

avec  $Y_0$  l'admittance du vide,  $n_C$  l'indice considéré et  $\theta$  l'angle du faisceau par rapport à la normale dans le milieu.

**P3A.2)** On considère que nos couches minces sont éclairées à  $480 \text{ nm}$  avec une incidence normale. Comment alors se simplifie la matrice  $M$  ? 1 pt

$M =$

On associe deux couches minces d'indice  $n$  et d'air pour la première et la seconde couche respectivement. A ces couches, on associe les matrices  $M_1$  et  $M_2$ .

**P3A.3)** Quelle est la matrice  $M_{12}$  de l'ensemble des deux couches ? 1 pt

$M_{12} =$

En fait on associe  $N$  paires de couches minces.

**P3A.4)** Quelle est la matrice  $M_T$  totale ?

0,5 pt

$$M_T =$$

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

$$r = \frac{Y_0 m_{11} + Y_0 Y_S m_{12} - Y_S m_{21} - Y_S m_{22}}{Y_0 m_{11} + Y_0 Y_S m_{12} + m_{21} + Y_S m_{22}}$$

avec  $m_j$  les valeurs de  $M_T$ .

**P3A.5)** Exprimez  $r$ , en fonction des indices optiques impliqués et concluez sur l'effet de la structuration pour un nombre  $N$  de paires de couches impliquées élevé.

1 pt

$$r =$$

**P3A.6)** Suivant les espèces, le nombre de couches constituant chaque crête varie. Ainsi le *morpho rheenor* a des écailles constituées de crêtes de 8 à 12 couches alors que le *morpho didius* présentant 6 à 8 couches. Quelle sera l'influence du nombre de couches ?

0.25 pt

**P3A.7)** Que se passe-t-il si l'on verse sur les ailes du papillon de l'huile de ricin dont l'indice optique est très proche de 1.5 ?

0.25 pt

**P3A.8)** Suivant les espèces de papillon, les distances typiques séparant les crêtes et les couches peuvent varier. Ainsi, pour les espèces du genre *eurema*, les distances impliquées sont plutôt de 60 nm et 90 nm pour les couches d'air et de chitine. Quelle conséquence cela pourra-t-il avoir ?

0.25 pt

**Partie 3B : Un élément diffractif**

chapitre de cours associé : 4

**2 points**

Nous regardons maintenant le comportement d'une aile de *morphus didius* en transmission. Le diagramme ci-contre montre la répartition de la lumière incidente en incidence normale (sur le schéma ci-contre, l'incidence normale est désignée à 90°) dans le milieu transmis.

**P3B.1)** Est-ce que l'aile du papillon agit comme un réseau de diffraction en amplitude ou bien en phase ? 0.25 pt

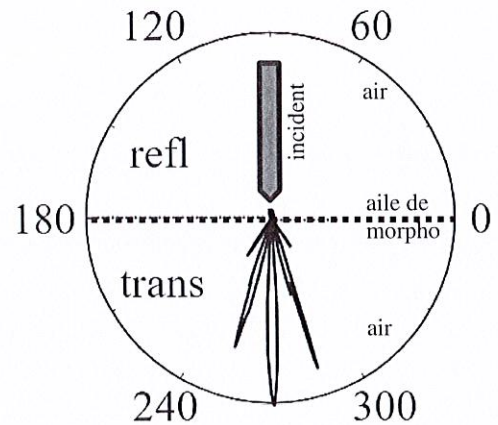


Figure 5 : Mesures expérimentales du diagramme de rayonnement de diffraction d'une aile de morpho didius 4

**P3B.2)** Rappelez la loi fondamentale des réseaux. 0.5 pt

**P3B.3)** On mesure un angle pour les pics diffractés les plus intenses une déviation par rapport à la normale de 16.7° pour un éclairage à 480 nm. Déduisez-en le pas  $\Lambda$  des structures de l'aile. 0.75 pt

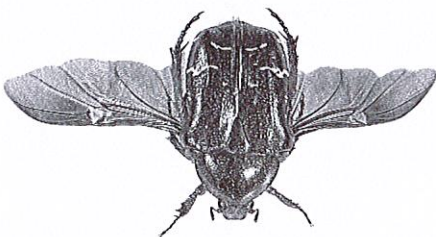
$$\Lambda =$$

**P3B.4)** Quelle sera la déviation exprimée en degré par rapport à la normale des pics diffractés d'ordre 2 ? 0.5 pt

**Partie 4 : Les reflets polarisés de la cétoine dorée**

chapitre de cours associé : 7

La cétoine dorée est un insecte aux reflets vert métallisé. Parmi les propriétés optiques intéressantes de sa carapace se trouve le fait que la lumière réfléchié a une polarisation circulaire gauche.



**P4.1)** Soit un champ électrique de composantes transverses  $E_x$  et  $E_y$ . Rappelez les conditions pour avoir une polarisation circulaire.

0.25 pt

**P4.2)** Exprimez le vecteur de Jones  $\underline{J}_c$  qui peut être attribué à une polarisation circulaire.

0.5 pt

$$\underline{J}_c =$$

**P4.3)** Mis à part le formalisme de Jones, quel autre formalisme connaissez-vous pour décrire la polarisation ? Quels en sont les avantages et inconvénients ?

0.5 pt

**P4.4)** On éclaire la cétoine par un faisceau collimaté et on analyse l'état de polarisation du faisceau réfléchi par la cétoine grâce à un polariseur traditionnel. Qu'observe-t-on ? A partir de cette seule observation, que peut-on conclure sur la nature de la polarisation ?

0.5 pt

Pour vérifier ce point, nous considérons que l'action d'un polariseur peut être modélisée par la matrice  $M_p$  2x2 suivante avec  $\theta$  l'orientation du polariseur par rapport à l'horizontale.

$$M_p = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$

**P4.5)** Comment s'appelle cette matrice ?

0.25 pt



**P4.6)** Calculez l'état de polarisation  $\vec{J}_p$  après l'analyseur traditionnel orienté suivant l'angle  $\theta$

1 pt

$$\vec{J}_p =$$

**P4.7)** Calculez l'intensité  $I_p$  de l'onde obtenue après le polariseur et discutez ce résultat. La loi de Malus est-elle vérifiée ?

1.25 pt

$$I_p =$$

A la place du polariseur, on place désormais une lame **demi-onde** faite en quartz (milieu uniaxe positif de biréfringence  $\Delta n = 0.009$ ) dont l'axe rapide est orienté avec un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontale. On s'intéressera particulièrement à ce qui se passe autour de la longueur d'onde 500 nm.

**P4.8)** Quels sont l'épaisseur  $e$  de la lame demi-onde en quartz et le déphasage introduit  $\Delta\varphi$  par cet élément biréfringent entre ses deux axes neutres ?

0.5 pt

$$e = \quad \text{(expression)} \quad = \quad \text{(valeur numérique à } \lambda = 500 \text{ nm)}$$

Nous rappelons l'expression générale de la matrice  $M_{WP}$  déterminant l'action d'une lame de phase constituée d'un matériau anisotrope uniaxe avec un déphasage introduit est  $\Delta\varphi$  :

$$M_{WP} = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha + e^{-i\Delta\varphi} \sin^2 \alpha & (1 - e^{-i\Delta\varphi}) \cos \alpha \sin \alpha \\ (1 - e^{-i\Delta\varphi}) \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha + e^{-i\Delta\varphi} \cos^2 \alpha \end{pmatrix}$$

**P4.9)** Comment se simplifie cette matrice pour le cas considéré ici ( $\alpha$  peut varier) ? Il sera possible d'utiliser les formules de trigonométrie d'addition et de soustraction d'angles pour simplifier les résultats.

0.75 pt

$$\begin{aligned} \cos(a+b) &= \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b) \\ \sin(a+b) &= \sin(a)\cos(b) + \cos(a)\sin(b) \end{aligned}$$

$$M_{HWP} =$$

**P4.10)** Calculez dans le formalisme de Jones l'état de polarisation en sortie.

0.75 pt

$$f_{HWP} =$$

**P4.11)** Quelle est la nature de la polarisation obtenue ? En déduire l'utilité de la lame demi-onde. Quel autre élément optique aurait pu avoir la même action ?

0.75 pt

**P4.12)** L'intensité lumineuse de sortie est-elle affectée par l'orientation de la lame  $\lambda/2$  ?

0.25 pt