

Compte rendu de projet

IRIDESCENCE D'UNE AILE DE MORPHO

OLYMPIADES DE LA PHYSIQUE 2003/2004

Site

Lycée Pasteur 800 rue Léon Blum 62110 HENIN-BEAUMONT
--

Encadrement :

LELIEVRE Philippe, professeur agrégé au lycée Pasteur

BRIAND Hélène, professeur agrégé au lycée Condorcet de Lens

COSLEOU JEAN, enseignant chercheur sur l'université de Lille 1

Elèves :

Elèves de 1^{re} S option sciences de l'ingénieur au lycée Pasteur en
2002/2003

COILLE Emmanuelle

GOLDBLATT Arnaud

PONTEL Amaury

TEDJINI Ahmed

CHLEBOWSKI geoffroy

SZYMANSKI Benjamin

PLAN DU COMPTE RENDU

I - Introduction

II - Origine de la couleur

III – Observation macroscopique

IV – Observation microscopique

V – Etude du prisme

VI – La structure lame mince

VII – Conclusion

VIII – Actions et sorties

INTRODUCTION

Il y a un peu plus d'un an, en mai 2002, monsieur Lelièvre et Mme Briand, deux professeurs de physique du lycée, sont passés dans notre classe de seconde afin de nous présenter leur club scientifique.

A l'époque, le sujet de notre travail n'était pas défini. La seule chose imposée, dans le cadre de l'opération magiphy était le thème d'étude que nous devions traiter : « la couleur »..

Après certaines hésitations, dues à la charge de travail supplémentaire que cela pouvait nous occasionner, pour diverses raisons, nous nous sommes lancés dans cette aventure, qui aujourd'hui se révèle très enrichissante.

En septembre 2002, lors des premières séances de travail, nous avons passé notre temps à faire des recherches afin de trouver un sujet intéressant traitant de la couleur. Celui-ci sera finalement : « la couleur des papillons » et après quelques travaux, il deviendra « l'iridescence d'une aile de morpho ».

Il existe de nombreuses espèces dans la famille des morphos, nous avons choisi comme papillon école « le morpho ménélaus », c'est celui que nous trouvons le plus beau, et comme on le verra par la suite, certainement le plus complexe à étudier.

Aujourd'hui, nous espérons vous montrer qu'à partir d'expériences simples, nous avons pu obtenir des résultats très probants.

II) Origines de la couleur

Les papillons font partie de la famille des lépidoptères, qui veut dire «aile écailleuse ». Une observation au microscope d'une aile en utilisant un grossissement de 100 fait apparaître clairement une organisation structurée des écailles à l'échelle macroscopique.

Les écailles recouvrent la totalité de la membrane de l'aile. De cette première observation, nous pouvons conclure que, quelle que soit son origine, la couleur prend naissance dans l'écaille.

La question qui se pose est : cette couleur est-elle pigmentaire ou structurale (ou combinaison des deux) ?

Il y a deux possibilités pour répondre à cette question :

- ✍ Faire disparaître les pigments par un traitement chimique, mais celui-ci pourrait également endommager une structure éventuelle.
- ✍ Faire disparaître la structure (d'un point de vue optique) en l'immergeant dans un liquide d'indice en accord avec l'indice de la structure.

En utilisant le trichloréthylène, d'indice 1,47, on s'aperçoit que le bleu laisse la place à une couleur marron presque noire.

La structure laisse pénétrer le liquide, le fond noir provient donc des pigments présents dans les écailles, l'opération est réversible, par évaporation du solvant, l'aile retrouve sa couleur de départ.

En utilisant un liquide d'indice intermédiaire, l'acétone ($n=1,3$), la couleur du morphe vire au vert, confirmant l'origine structurale de la couleur.

Cette première expérience est porteuse de nombreuses informations :

- ✍ La couleur provient d'une structure
- ✍ L'indice de la structure est d'environ 1,5
- ✍ Les pigments sur les écailles sont noirs, cela forme un fond opaque empêchant toutes réflexions parasites, donnant cet aspect métallique à notre morphe.

La suite de notre travail se résumera à définir la structure responsable de cette couleur.

Quatre possibilités s'offrent à nous :

1. La diffusion
2. La diffraction par une structure type réseau
3. La dispersion au passage dans un prisme
4. Interférences lumineuses par une lame mince

III) Observation macroscopique

Nous avons fabriqué une planche graduée sur laquelle nous pouvons photographier une aile de papillon sous différents angles (de -80° à $+80^\circ$).

En réalisant un album de ces photographies, on remarque la chose suivante :

La couleur change du bleu/violet aux incidences rasantes négatives vers le vert en incidence normale pour revenir au bleu/violet en incidences rasantes positives.

L'observation plus précise montre également que la symétrie des couleurs autour du vert ne se fait pas exactement à zéro degré mais plutôt vers les dix degrés. (cette observation nous sera très utile dans la suite de notre travail)

L'iridescence de notre papillon annule l'une de nos possibilités : le phénomène de diffusion ;

En effet, quel que soit l'angle sous lequel nous regardons le ciel, nous voyons toujours le même bleu, l'incidence n'a donc pas d'influence sur la diffusion, il nous reste donc trois possibilités.

IV) Observation microscopique

L'observation macroscopique ne pouvant pas donner plus d'informations, nous avons donc décidé d'aller voir plus en profondeur la structure d'une écaille de papillon.

Afin d'augmenter notre grossissement mais aussi dans un souci de présentation, nous avons couplé le microscope avec un caméscope relié à un téléviseur.

En grattant une aile de morpho, nous déposons sur une plaque de microscope quelques écailles, nous pouvons directement observer sur l'écran une structure composée de stries longitudinales, espacées régulièrement, nous faisant de suite penser à une structure type réseau par réflexion ;

Nous avons donc essayé de trouver approximativement le pas du réseau, pour cela il y a deux techniques :

- ✍ Une méthode reposant sur les lois de l'optique géométrique (voir annexe 1)
- ✍ Une technique d'étalonnage, en mesurant l'espace inter-strie à l'écran de l'écaille de morpho et en le comparant avec un réseau commercial à 530 traits par mm. Il suffit de faire un produit en croix pour trouver le pas du réseau.

Dans les deux cas nous trouvons une valeur de 800 à 900 traits par mm.

A ce moment de notre étude, nous pensons avoir trouvé la structure responsable de la couleur du morpho, pour confirmer cela, nous avons réalisé un spectre à l'aide d'un réseau par réflexion de 1000 traits par mm (presque identique au morpho).

L'observation du spectre et la comparaison avec les couleurs de notre morpho montrent trois différences fondamentales :

- ✍ Dans le spectre, nous obtenons du rouge et du jaune, couleurs que nous ne retrouvons pas chez le morpho. Ceci pourrait s'expliquer par une absorption de ces couleurs par des pigments présents dans l'écaille.
- ✍ L'ordre zéro est blanc dans notre spectre, si nous regardons le morpho en incidence normale, nous ne le voyons pas blanc, ceci pourrait également s'expliquer par les mêmes raisons qu'au-dessus.
- ✍ La différence fondamentale, dans le spectre du réseau, le bleu est moins dévié que le vert alors que dans le morpho c'est l'inverse. (cf observation macroscopique)

La structure réseau existe bien mais elle n'est pas prépondérante dans la couleur du papillon.

Il nous reste donc à ce moment deux possibilités : la dispersion par un prisme et les interférences par lame mince.

V) Etude du prisme

Nous avons cette fois réalisé un spectre de la lumière blanche avec un prisme.

En comparant le spectre aux couleurs du papillon, on peut faire deux remarques :

- ✍ On obtient toujours du rouge et du jaune dans le spectre du prisme, ce qui peut s'expliquer comme précédemment.
- ✍ Cette fois le bleu est plus dévié que le vert, ce qui correspond mieux a notre papillon.

Nous pouvons donc penser à une structure prismatique, néanmoins notre expérience se fait en transmission, or les couleurs du papillon se regardent en réflexion.

Cette remarque suppose des conditions de réflexions totales sur l'une des faces du prisme.

Une étude théorique du prisme (voir annexe 2) montre qu'on ne peut pas obtenir d'effets d'iridescence pour des incidences faibles par rapport au plan de la membrane; on n'est plus dans les conditions de réflexions totales.

L'hypothèse de la structure prismatique doit donc être écartée et la seule possibilité restante est donc la structure type lame mince.

VI) La structure type lame mince

Cette structure ne peut donc exister qu'au niveau des stries, il fallait trouver une expérience permettant de montrer l'influence de cette structure sur les couleurs du morpho.

Nous nous sommes donc intéressés à la théorie des couches minces d'indice (n) et d'épaisseur (e).

En calculant la différence de marche des rayons qui interfèrent de façon destructives, nous avons pu trouver une relation reliant l'angle d'incidence (i) avec la longueur d'onde d'extinction (λ_{\min}).

$$\text{Sin}^2(i) = -((k^2 \lambda_{\min}^2)/(4e^2)) + n^2$$

En analysant cette relation, si pour chaque incidence on peut trouver la valeur de λ_{\min} , il est possible de trouver la valeur de l'épaisseur et de l'indice en traçant $\text{Sin}^2(i)$ en fonction de λ_{\min}^2 .

L'idée est de prendre des photos sous différents angles, cette fois ci sur pellicule diapositive.

Nous coupons ensuite la diapo et nous la collons sur une cuve de spectrophotométrie.

Le lycée Pasteur possède un spectrophotomètre bi-faisceau à balayage automatique des longueurs d'ondes, le faisceau de référence traverse une cuve sur laquelle nous avons placé une diapo vierge.

En travaillant en transmission nous avons pu relever les valeurs suivantes (spectrophotométries en annexe) :

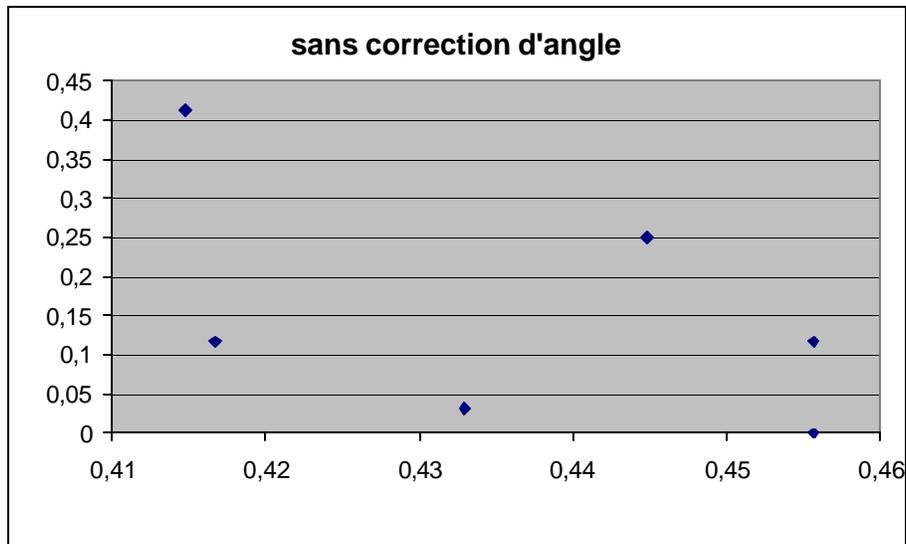
i	-20	-10	0	20	30	40
λ_{\min} (nm)	0.6455	0.658	0.675	0.675	0.667	0.644

Le minimum de transmission correspond au minimum de réflexion pour le papillon.

Lors de cette expérience, on a rencontré les problèmes suivants :

- ✍ On ne peut travailler qu'aux faibles incidences (entre -40° et 40°), en incidence rasante, l'image de l'aile est trop petite sur la diapo et ne permet pas le passage du faisceau sur la partie colorée.
- ✍ Les incertitudes de mesures sont assez importantes

Suite à ces mesures, nous avons voulu tracer la courbe et nous avons obtenu le résultat suivant :



On s'aperçoit facilement que les points ne sont pas alignés, cette expérience nous paraissait peu concluante.

Nous avons donc recommencé plusieurs fois la prise de photo pour des résultats similaires.

La solution de notre problème se trouve dans l'observation macroscopique mais aussi dans une lecture plus pointue de nos résultats.

Dans le tableau de mesures, on remarque que les valeurs zéro et 20 degrés donnent le même résultat, c'est la même chose pour les valeurs -20° et 40° .

Dans l'observation macroscopique, on avait déjà remarqué la symétrie des couleurs autour de 10 degrés.

Cette symétrie autour de la valeur 10° , peut s'expliquer par une inclinaison des lames minces de 10° par rapport au plan de la membrane de l'aile, ainsi un faisceau arrivant

En analysant les résultats, 1,57 correspond à peu près à l'indice du trichloréthylène et 0,217 μm représente la moitié de la longueur d'onde du bleu, couleur dominante chez notre morpho.

Il est bien évident que ces mesures représentent un indice moyen et une épaisseur moyenne d'une structure multicouche (voir schéma correction d'angle du dessus) permettant d'obtenir un meilleur coefficient de réflexion.

VII) Conclusion

De toutes les expériences, notre morpho a bien une structure type réseau formée de stries mais chaque strie est elle-même composée d'une structure multicouche qui prédomine sur l'effet réseau.

Le fond pigmentaire noir de ce papillon permet aux couleurs structurales de bien se détacher et de donner cet aspect métallique.

Tous les morphos ont une structure semblable à celle-ci, mais un pas de réseau différent, un fond pigmentaire moins noir ou encore des écailles de recouvrement non transparentes donnent des effets de couleur bien différents.

L'étude de ce papillon, nous a permis d'étudier les différents phénomènes optiques responsables de la formation de couleur.

Nous avons ainsi monté ce projet intéressant dont l'aboutissement se fera devant vous.

Nous ne pouvions finir ce compte rendu sans remercier les partenaires de notre projet, tout d'abord Monsieur Jean Cosléou (universitaire sur Lille1) et les élèves du collège de Fouquières-les-Lens avec lesquels nous avons partagé beaucoup de moments.

Nous tenons aussi à remercier la direction de notre lycée, Monsieur Vantours (proviseur) et Monsieur Gorgol (Proviseur -adjoint) pour leur soutien moral et matériel.

Pour finir, nos professeurs qui nous ont encadrés et aidés tout au long de cette année, madame Briand et Monsieur Lelièvre.

VIII) Actions et sorties

Opération magiphy

C'est une action mise en œuvre sur l'Académie de Lille en 2002/2003 et reconduite cette année.

Elle a bien sûr pour vocation de promouvoir les sciences-physiques et s'articule autour de la couleur, elle s'est achevée en mai 2003 par la première joute magiphy au forum des sciences de Villeneuve-d'Ascq.

Cette joute a permis aux 5 équipes participantes, de montrer le travail accompli durant l'année devant un jury de professionnel.

Chaque équipe est en fait un trinôme composé d'une association collège/lycée/université, notre équipe a obtenu le prix du jury.

Festival des lycéens et apprentis

En avril 2003, nous avons participé à cette manifestation organisée par le conseil régional au stade couvert de Liévin.

Cette manifestation a pour but de valoriser les actions entreprises par les lycéens de la région Nord Pas-de-Calais.

Nous avons donc représenté notre lycée et les sciences peu présente sur le festival, cela nous a permis d'obtenir également un petit financement pour le fonctionnement de notre atelier.

Rencontre avec un chercheur (article de journal en annexe 3)

En avril 2003, par l'intermédiaire de Jean Cosléou et de la SFP, nous avons rencontré dans notre lycée Serge Berthier, chercheur en optique des solides à l'université de Paris VII et aussi spécialiste de la couleur des insectes.

Cette matinée nous a permis de montrer notre travail et aussi de faire évoluer notre projet suites aux conseils donnés par Serge Berthier ;

Expo-sciences

En juin 2003, nous avons participé à Loos les Lille au regroupement de tous les ateliers scientifiques de l'Académie de Lille, faisant partie d'un atelier scientifique, nous nous devons de présenter notre travail.

Fête de la science 2003

En octobre 2003, notre lycée par l'intermédiaire de monsieur Gorgol (proviseur adjoint) a organisé sur Hénin-Beaumont la fête de la science avec la participation des collèges et lycées de la ville.

L'objectif de ces deux jours était de faire découvrir des expériences scientifiques à des élèves de CM1 et CM2 de la ville.

Nous faisons partie du pôle physique des couleurs et les élèves venaient sur notre stand pour faire des manipulations et répondre à un questionnaire que nous avons préalablement réalisé et donné aux professeurs des écoles.

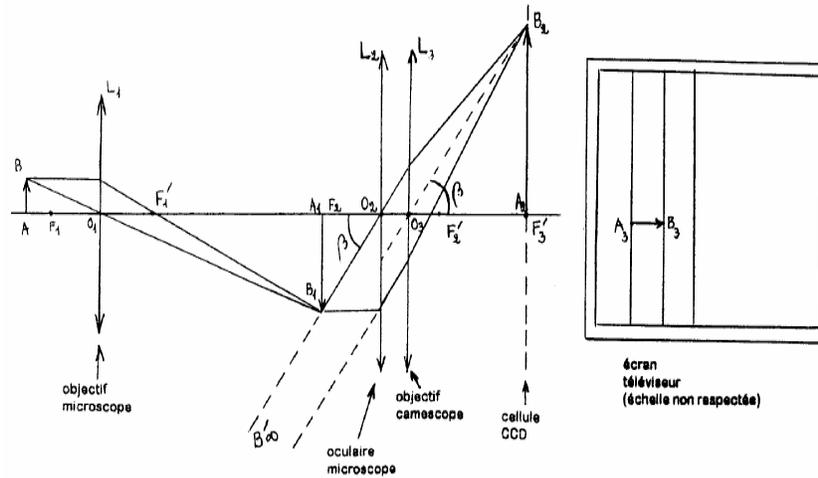
L'intérêt et l'envie montrés par les petits face aux expériences ont été pour nous certainement la représentation la plus enrichissante.

Divers

Nous avons également participé durant cette année scolaire, à la journée de l'engagement ainsi qu'aux journées portes ouvertes de notre lycée.

Ces deux actions avaient comme objectif de montrer aux collèges de notre secteur les activités réalisées par les élèves de notre lycée.

Annexe 1 : Mesure du pas du réseau



- ⊗ AB : objet vu par l'objectif du microscope
- ⊗ A₂B₂ : image obtenue sur la cellule CCD du caméscope
- ⊗ A₃B₃ : image définitive sur l'écran du téléviseur

Un microscope donne un grossissement commercial G_c correspondant à l'angle β sous lequel on voit l'image à l'infini dans l'oculaire sur l'angle α sous lequel est vu l'objet placé à 25 cm (PP de l'œil)

$$G_c = \frac{?}{?} \text{ avec } a = \frac{AB}{0.25} = 4 * AB$$

$$G_c = \frac{?}{4 * AB} \text{ ce qui donne}$$

$$AB = \frac{?}{4 * G_c}$$

On place le caméscope sur l'oculaire du microscope, les rayons sortant sont parallèles entre-eux (microscope réglé), on peut donc dire que :

$$\tan \beta = \frac{A_2 B_2}{f'_3}, \text{ en se plaçant dans les conditions de gauss, on peut dire } \beta = \frac{A_2 B_2}{f'_3}$$

$$AB = \frac{A_2 B_2}{4 * G_c * f'_3}$$

La relation entre l'image sur la télévision et celle sur la cellule est une relation simple de

$$\text{proportionnalité } k = \frac{\text{diagonale de l'écran}}{\text{diagonale de cellule}} = \frac{A_3 B_3}{A_2 B_2}$$

La relation existante entre l'objet et l'image sur la télévision est donc

$$AB = \frac{A_3 B_3}{4 * G_c * f'_3 * k}$$

Le pas du réseau étant en nombre de traits par millimètre on trouve donc

$$n = \frac{0.001}{AB}$$

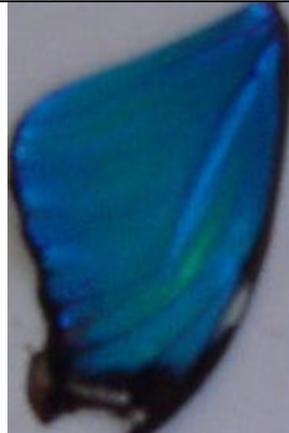
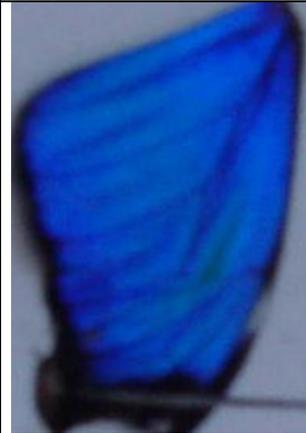


Angle -80 degrés

Angle -70 degrés

Angle -60degrés

Angle -50 degrés



Angle -40 degrés

Angle -30 degrés

Angle -20 degrés

Angle -10 degrés

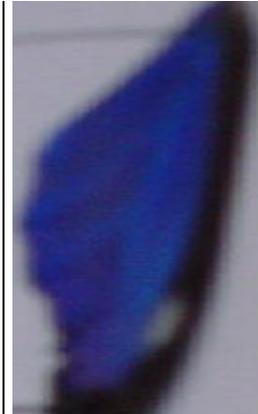


Angle zéro

Angle +10 degrés

Angle +20 degrés

Angle +30 degrés

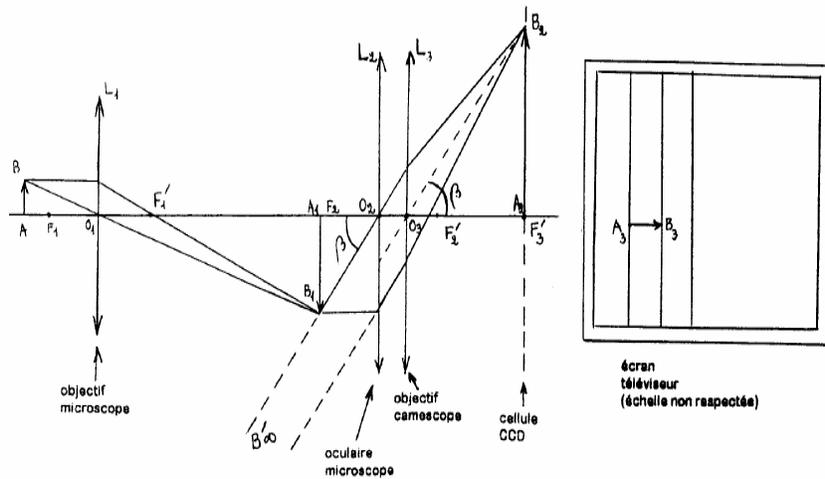


Angle +40degrés

Angle +50 degrés

Angle +60 degrés

Angle +70 degrés



- ⊗ AB : objet vu par l'objectif du microscope
- ⊗ A₂B₂ : image obtenue sur la cellule CCD du caméscope
- ⊗ A₃B₃ : image définitive sur l'écran du téléviseur

Un microscope donne un grossissement commercial G_c correspondant à l'angle β sous lequel on voit l'image à l'infini dans l'oculaire sur l'angle α sous lequel est vu l'objet placé à 25 cm (PP de l'œil)

$$G_c = \frac{?}{?} \text{ avec } a = \frac{AB}{0.25} = 4 * AB$$

$$G_c = \frac{?}{4 * AB} \text{ ce qui donne}$$

$$AB = \frac{?}{4 * G_c}$$

On place le caméscope sur l'oculaire du microscope, les rayons sortants sont parallèles entre eux (microscope réglé), on peut donc dire que :

$$\tan \beta = \frac{A_2 B_2}{f'_3}, \text{ en se plaçant dans les conditions de Gauss, on peut dire } \beta = \frac{A_2 B_2}{f'_3}$$

$$AB = \frac{A_2 B_2}{4 * G_c * f'_3}$$

La relation entre l'image sur la télévision et celle sur la cellule est une relation simple de proportionnalité $k = \frac{\text{diagonale de l'écran}}{\text{diagonale de cellule}} = \frac{A_3 B_3}{A_2 B_2}$

La relation existante entre l'objet et l'image sur la télévision est donc

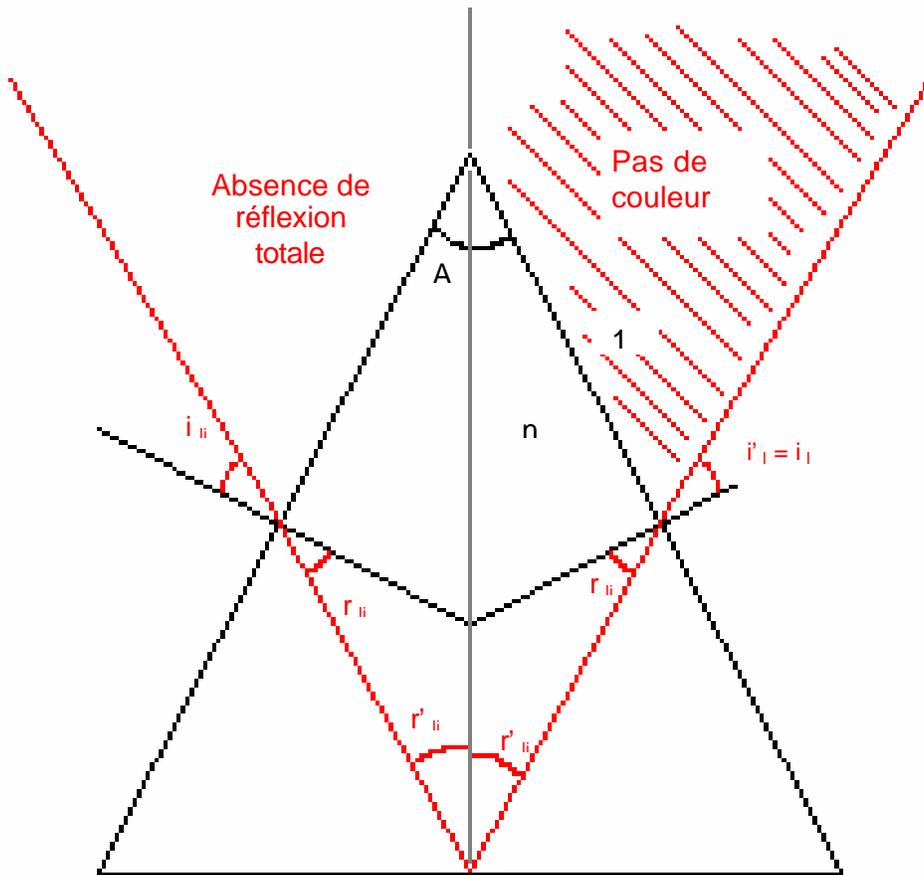
$$AB = \frac{A_3 B_3}{4 * Gc * f'_3 * k}$$

Le pas du réseau étant en nombre de traits par millimètre on trouve donc

$$n = \frac{0.001}{AB}$$

Le Prisme

Etude faite en prenant $A = 60^\circ$ et $n = 1,5$.



Pour que la réflexion soit totale sur une face du prisme, il faut que $r' > r'_{\text{limite}}$

$$n \cdot \sin(r'_{\text{limite}}) = 1 \cdot \sin(90^\circ) \Leftrightarrow \sin(r'_{\text{limite}}) = 1/n \Leftrightarrow r'_{\text{limite}} = \arcsin(1/n)$$

$$\Rightarrow r'_{\text{limite}} = 41,8^\circ$$

Condition sur r :

$$r + r' = A \Rightarrow r_{\text{limite}} = A - r'_{\text{limite}}$$

$$r_{\text{limite}} < A - r'_{\text{limite}}$$

$$r_{\text{limite}} < 60 - 41,8 \Rightarrow r_{\text{limite}} < 18,2^\circ$$

Cependant, d'un point de vue expérimental, on ne peut mesurer l'angle de réfraction à l'intérieur d'une aile de papillon. Il faut donc se placer en fonction de i , c'est-à-dire l'angle d'incidence.

Condition sur i :

$$\sin(i) = n \cdot \sin(r)$$

$$\sin(i_{\text{limite}}) = n \cdot \sin(r_{\text{limite}})$$

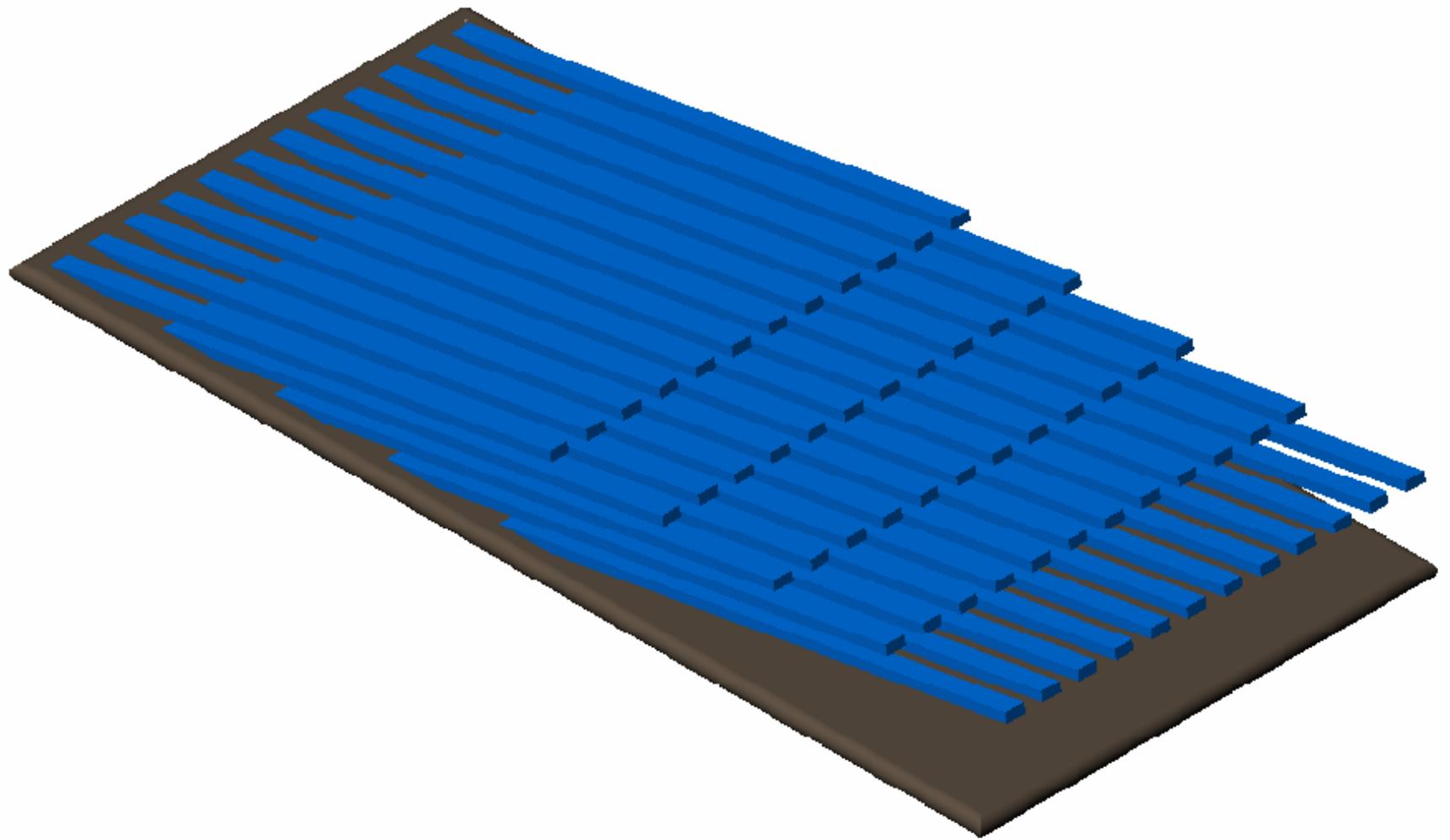
$$\Leftrightarrow \sin(i_{\text{limite}}) = 1,5 \cdot \sin(18,2)$$

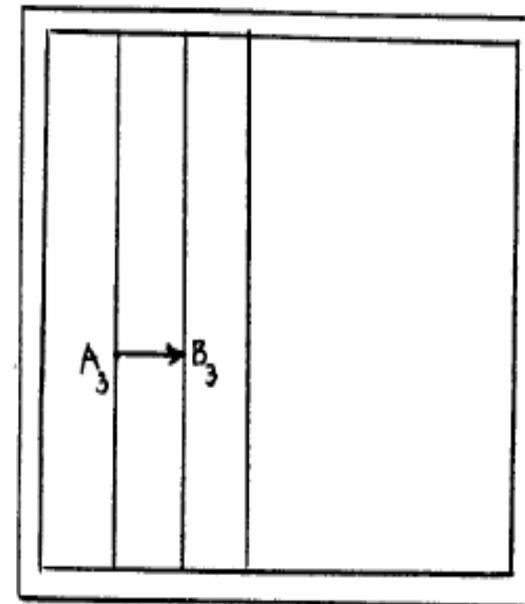
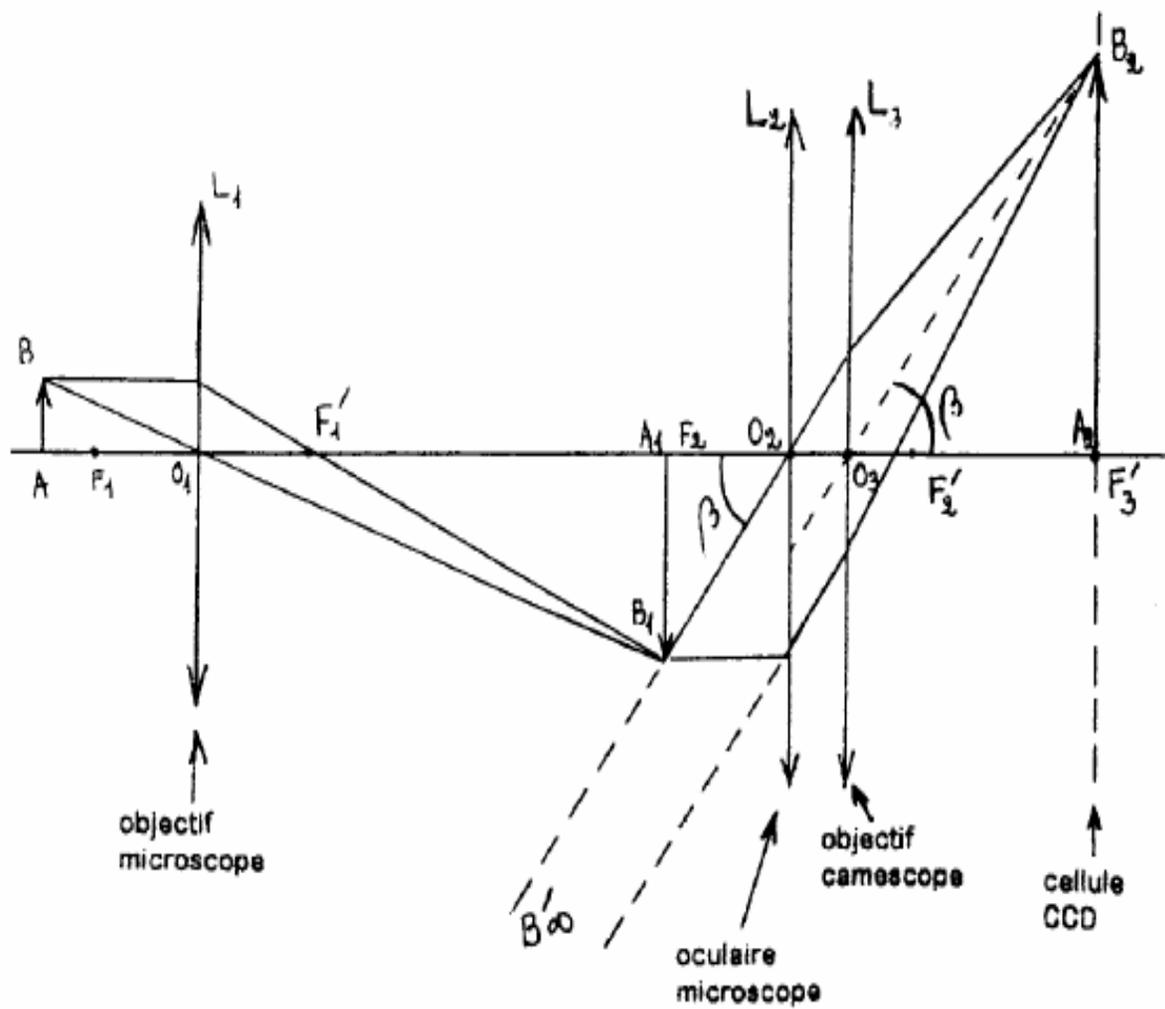
$$\Leftrightarrow i_{\text{limite}} = 27,9^\circ$$

$$\Leftrightarrow i_{\text{limite}} < 27,9^\circ$$

pour avoir une réflexion totale, et donc des couleurs.

Or, sur le morpho, on obtient de la couleur même en incidence normale.





écran
 téléviseur
 (échelle non respectée)