

On rappelle qu'il existe deux classes d'interféromètres :

- Les **interféromètres à division du front d'onde** : différentes parties d'un front d'onde sont séparées par des dispositifs optiques (miroirs, lentilles, trous, etc.) pour ensuite être réunies après avoir parcouru des chemins différents ;
- Les **interféromètres à division d'amplitude** : une onde est envoyée sur un dispositif semi-réfléchissant, qui sépare l'onde en deux parties qu'il est possible d'ensuite recombinaison après leur avoir fait parcourir un chemin différent.

Le chapitre précédent concernait l'étude extensive du dispositif à séparation du front d'onde le plus classique : les fentes (ou les trous) d'Young. On aborde ici de manière plus succincte l'exemple le plus classique d'interféromètre à division du front d'onde : l'**interféromètre de Michelson**. Le chapitre consiste simplement en la présentation du dispositif, faisant intervenir des miroirs et des lames semi-réfléchissantes, puis une étude de ses deux configurations d'utilisation : en « lame d'air », et en « coin d'air ».

TABLE DES MATIERES

I - INTERFEROMETRE DE MICHELSON ET DIVISION DU FRONT D'ONDE	1
I.1 - Dispositif expérimental	1
I.2 - Modèle simplifié de fonctionnement	2
II - UTILISATION EN « LAME D'AIR »	3
II.1 - Allure et localisation des franges	3
II.2 - Différence de marche	3
II.3 - Calcul de l'allure des franges	4
III - UTILISATION EN « COIN D'AIR »	5
III.1 - Allure et localisation des franges	5
III.2 - Différence de marche	5
III.3 - Utilisation en lumière blanche	6

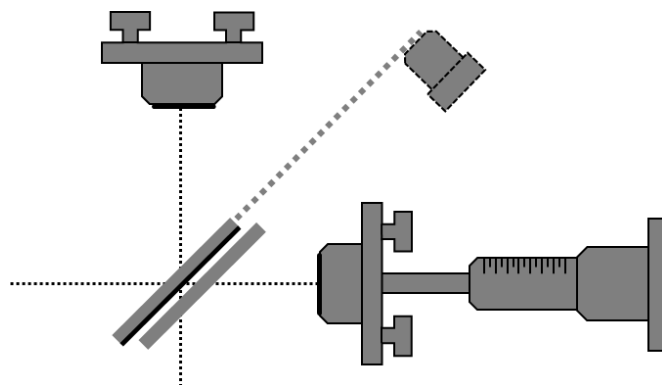
I - INTERFEROMETRE DE MICHELSON ET DIVISION DU FRONT D'ONDE

Lors du chapitre précédent, nous avons étudié l'effet d'un élargissement de la source de lumière sur les franges d'interférences, pour montrer que l'augmentation de la luminosité ne pouvait se faire qu'au prix d'une réduction du contraste (et donc d'une disparition progressive des interférences).

Les interféromètres à division d'amplitude ne présentent pas cette limitation : ils permettent d'obtenir des figures d'interférences à la fois brillantes et contrastées, en étant utilisés par des sources étendues.

I.1 - Dispositif expérimental

Dans un interféromètre à division d'amplitude, un faisceau issu de la source est envoyé sur une lame semi-réfléchissante qui le transmet et le réfléchit partiellement (avec une intensité lumineuse égale). Chaque faisceau est alors amené à suivre un chemin d'une longueur réglable (via des miroirs mobiles) avant d'être superposé avec l'autre faisceau pour produire des interférences.



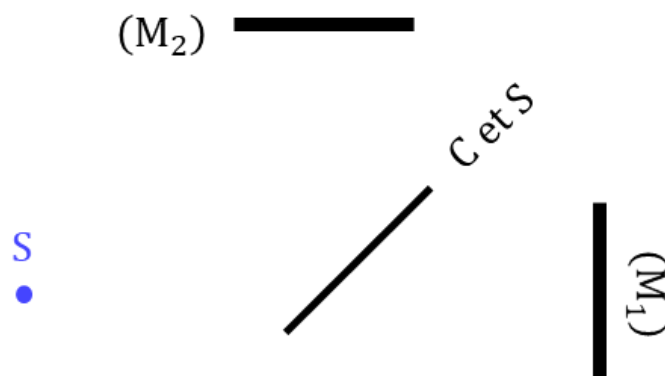
Description des éléments :

- (V_t) est la vis de translation du miroir (M_1) : elle permet de rapprocher ou éloigner le miroir du centre du Michelson sans changer son orientation. Son déplacement est indiqué par un vernier de précision, et ne peut se faire que sur une distance de quelques mm.
- (V_i) sont les vis d'inclinaison des miroirs (M_1) et (M_2) : elles permettent de modifier l'inclinaison des miroirs, sans changer leur distance au centre du Michelson.

- lame semi-réfléchissante, appelée séparatrice (S) : c'est elle qui sépare le faisceau issu de la source en deux faisceaux d'intensités égales, chacun dirigés vers l'un des miroirs. C'est une lame de verre dont une face est recouverte d'une fine pellicule métallique.
- Compensatrice (C), dont l'unique rôle est de faire en sorte que les deux rayons parcourent une même distance dans le verre¹.

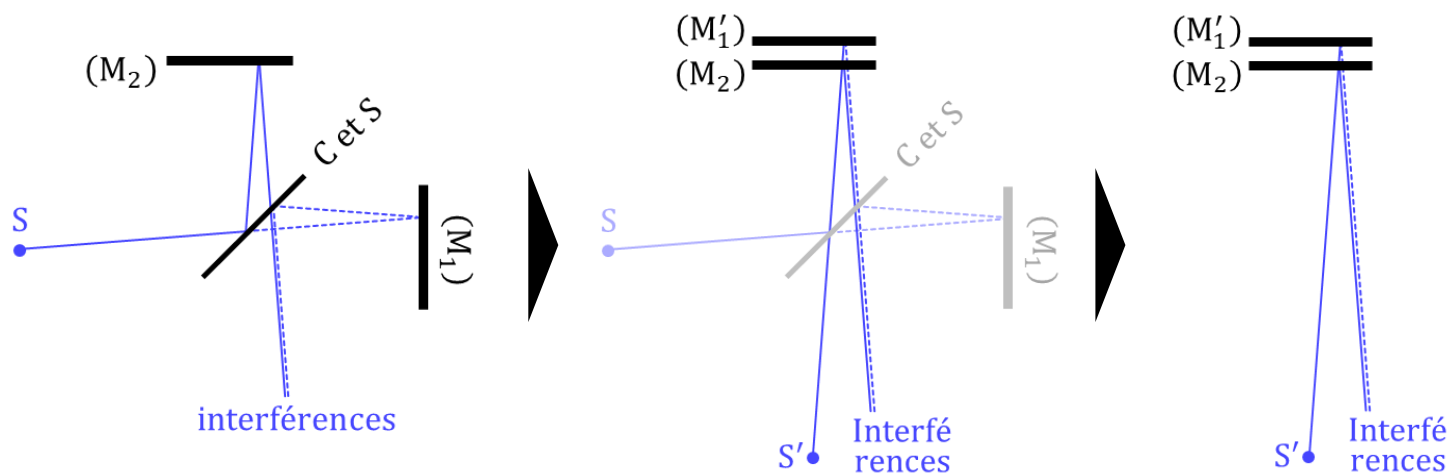
Le Michelson est un instrument cher : son prix est au minimum de quelques milliers d'euros. La raison principale est la qualité et la précision de tous les éléments qui le composent : le déplacement des miroirs doit être extrêmement précis, le support ne doit pas trop se dilater avec la chaleur, les faces des lames de verre et des miroirs doivent être parfaitement planes, de sorte à ne pas induire de défaut dans la direction est faisceaux, etc.

Cet interféromètre a été mis au point par Albert Michelson à la fin du 19^{ème} siècle, et a été utilisé pour l'une des expériences les plus célèbres de l'histoire de la physique : l'expérience de Michelson-Morley, en 1887. L'objectif de cette expérience était de mesurer avec précision la vitesse de la lumière dans deux directions : une selon le déplacement de la Terre autour du soleil (à $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), l'autre selon la direction perpendiculaire. Le résultat a permis de montrer l'indépendance de la vitesse de la lumière vis-à-vis de la vitesse du référentiel d'observation, propriété hautement contre-intuitive qui ne sera expliquée qu'avec la publication de la relativité restreinte, en 1905.



1.2 - Modèle simplifié de fonctionnement

Dans toute la suite, l'association des lames séparatrice et compensatrice est modélisée par une unique lame semi-réfléchissante, infiniment mince et séparant le faisceau en deux parties d'amplitude (ou de puissance lumineuse) identique. De plus, un faisceau réfléchi sur un miroir plan peut être considéré comme un faisceau issu d'une source virtuelle située en un point symétrique à la source réelle, par rapport au plan du miroir. On peut alors construire le modèle de fonctionnement simplifié de l'interféromètre :



On a déjà mentionné qu'il est possible de modifier séparément la position du miroir (M_1) en translation, et des miroirs (M_1) et (M_2) en inclinaison. On considèrera dans la suite deux cas distincts :

- Une configuration « lame d'air » : les miroirs (M'_1) et (M_2) sont parallèles, mais le miroir (M'_1) est translaté de sorte à pouvoir faire varier la longueur des chemins parcourus par les deux faisceaux ;
- Une configuration « coin d'air » : les miroirs (M'_1) et (M_2) sont placés de sorte à créer des chemins de longueur équivalente pour les deux faisceaux, mais ils ne sont pas parallèles entre eux ; il existe un très faible angle α entre les deux.

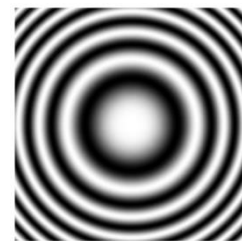
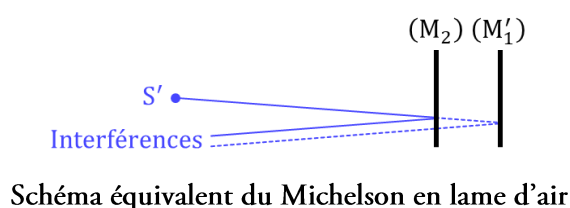
¹ Sans cette lame compensatrice, l'un des faisceaux parcourt trois épaisseurs de verre, alors que l'autre n'en parcourt qu'une seule. Puisque le verre est un milieu dispersif (l'indice optique dépend de la longueur d'onde qui le traverse), la différence de marche entre les faisceaux dépend alors de la longueur d'onde utilisée. Cela complique inutilement l'interprétation des résultats en cas d'utilisation de lumière polychromatique. Grâce à la compensatrice, chaque faisceau parcourt 4 épaisseurs de verre, et le problème disparaît.

II - UTILISATION EN « LAME D'AIR »

II.1 - Allure et localisation des franges

Interféromètre de Michelson en « lame d'air »

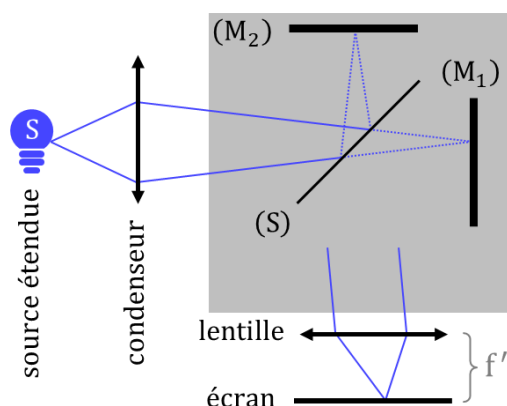
Un interféromètre de Michelson est en configuration « lame d'air » lorsque les miroirs (M'_1) et (M_2) sont parallèles (les miroirs réels (M_1) et (M_2) sont donc perpendiculaires).



Deux observations expérimentales :

- En configuration lame d'air, la figure d'interférences est d'autant mieux contrastée que l'on observe à grande distance de l'interféromètre : les **interférences sont localisées à l'infini**. Le plus pratique est donc de les observer **dans le plan focal d'une lentille convergente**.
- La figure d'interférences est optimisée en taille (nombre d'anneaux), en luminosité et en contraste lorsque les miroirs sont éclairés par un faisceau convergent. En pratique, une solution efficace est de **former l'image de la source primaire sur les miroirs** à l'aide d'une lentille convergente appelée condenseur.

Michelson en « lame d'air » : réglage et résultats



Allure des franges : anneaux circulaire (« anneaux d'égale inclinaison »)

Localisation des franges : à l'infini (observation dans le plan focal d'une lentille convergente « de projection »)

Faisceau entrant : convergent sur les miroirs, utilisation d'une lentille convergente (condenseur)

Attention : sur l'image ci-contre, les rayons issus de la source ne sont pas les mêmes que ceux arrivant sur l'écran.

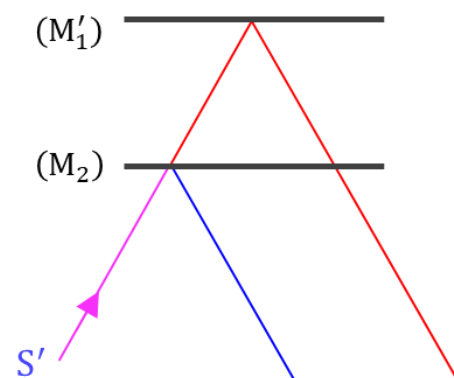
Un fois l'interféromètre bien réglé, on observe les anneaux d'interférence représentés plus haut. Dans la sous-partie suivante, on retrouve l'allure de ces anneaux par le calcul de la différence de marche entre les deux chemins.

II.2 - Différence de marche

Démonstration - Calcul de la différence de marche, allure des franges

On raisonne sur le schéma équivalent du Michelson en lame d'air, représenté ci-contre avec deux rayons issus de la source S' , arrivant sur les miroirs avec un angle d'incidence i . Ils se réfléchissent avec le même angle.

Déterminer la différence de marche entre deux rayons d'inclinaison i qui convergent au point M après la lentille de protection (non représentée ici).



Différence de marche en configuration lame d'air

Puisqu'on observe les rayons dans le plan focal d'une lentille convergente, chaque point image sur l'écran est formé des rayons arrivant parallèle entre eux, avec la même inclinaison. En configuration lame d'air, d'épaisseur e , tous les rayons repartant avec l'angle i ont subi la même différence de marche :

$$\delta = 2 e \cos(i) \quad p = \frac{1}{\lambda} 2e \cos(i) \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2e \cos(i) \quad \left(\cos(i) \simeq 1 - \frac{i^2}{2} \right)$$

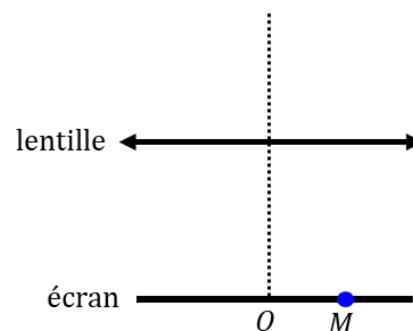
II.3 – Calcul de l'allure des franges

On a calculé la différence de marche des rayons d'indinaison i , qui chacun convergeront un même point M de l'écran. Par des règles d'optique géométrique simples, on peut déterminer la position du point correspondant sur l'écran, ainsi que diverses caractéristiques de la figure d'interférences obtenue.

Démonstrations – Allure des franges d'interférences

On observe la figure d'interférences obtenue en lame d'air d'épaisseur e , observée dans le plan focal image d'une lentille convergente de focale f' . La source est monochromatique.

1. Exprimer le rayon $R = OM$ de l'anneau correspondant à un ordre d'interférence égal à p . Peut-on définir un interfrange ?
2. Où est situé l'anneau dont l'ordre d'interférence est nul ? Maximal ? Minimal ?
3. Qu'observe-t-on au **contact optique**, c'est-à-dire pour $e = 0$?
4. Comment évolue le rayon d'un anneau d'ordre p fixé lorsque l'épaisseur de la lame d'air change ?

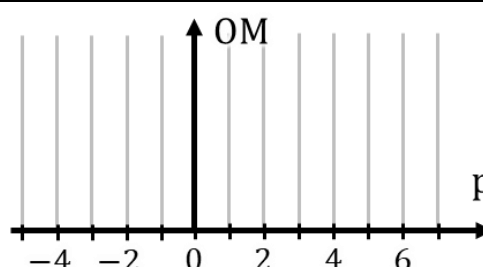


Différence de marche en configuration lame d'air

Le rayons des anneaux observés au plan focal d'une lentille de focale f' est donné par :

$$OM_p = f' \sqrt{2 - \lambda p / e} \quad (p \in \mathbb{Z})$$

L'écart entre anneaux n'est pas régulier, et l'anneau le plus petit n'est pas celui donc l'ordre d'interférence p est minimal.

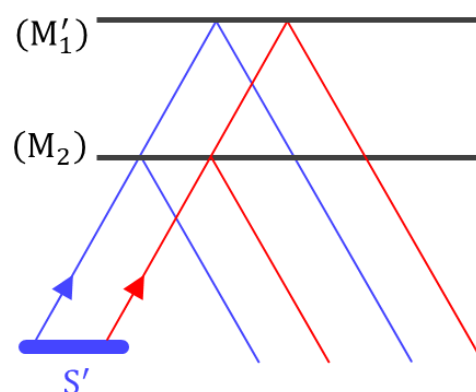


Simulation
Michelson



L'intérêt de l'interféromètre de Michelson (et plus globalement, des interféromètres à division d'amplitude) se manifeste lorsqu'on calcule la différence de marche entre deux rayons qui convergent vers un même point M : **$\delta(M)$ ne dépend que de l'angle d'incidence de ces deux rayons**. Cela signifie que chaque point de la source envoyant un rayon dont l'angle d'incidence est i créera une frange brillante au même endroit que tous les autres points ayant envoyé un rayon avec le même angle i . Ainsi, **un anneau brillant est issu de la contribution de tous les points de la source**, quand bien même tous leurs rayonnements sont incohérents entre eux !

C'est ce qui explique pourquoi, malgré un dispositif cher et précis, il est incomparablement plus commode d'observer des interférences avec un Michelson (plutôt que des fentes d'Young).



III - UTILISATION EN « COIN D'AIR »

Jusqu'à maintenant, le déplacement du miroir M'_1 se faisait à orientation constante ; les deux miroirs restaient parfaitement perpendiculaires. Désormais, on règle le miroir en lame d'air d'épaisseur nulle (de sorte à ce que la différence de marche soit nulle), puis on s'autorise à modifier l'inclinaison du miroir M'_1 (sans le translater) : on étudie alors la configuration « coin d'air » de l'interféromètre de Michelson.

III.1 – Allure et localisation des franges

Interféromètre de Michelson en « coin d'air »

Un interféromètre de Michelson est en configuration « coin d'air » lorsque les miroirs (M'_1) et (M_2) sont à distance égale, mais non-parallèles : il y a un angle α entre eux (expérimentalement, $\alpha < 0,01^\circ$).

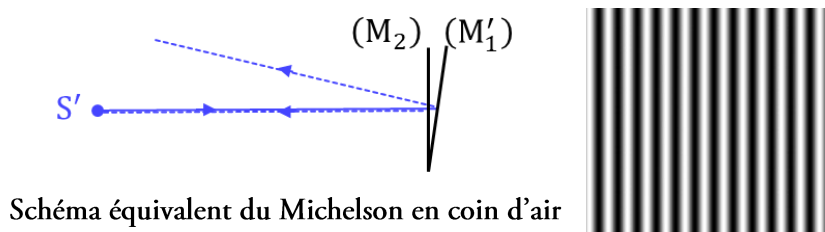
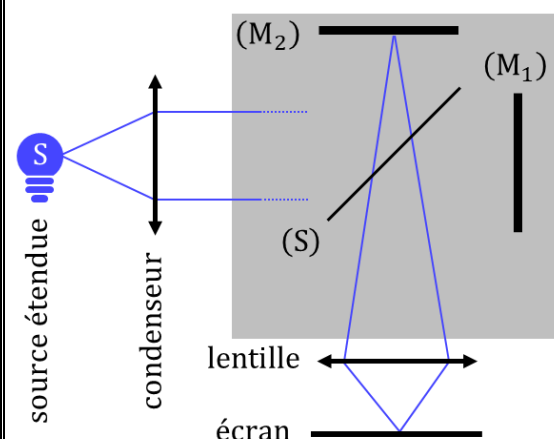


Schéma équivalent du Michelson en coin d'air

Observation expérimentale : en configuration coin d'air, la figure d'interférences est très peu contrastée, sauf si on fait l'image des miroirs sur l'écran, via une lentille convergente : les interférences sont localisées sur les miroirs.

Michelson en « coin d'air » : réglage et résultats



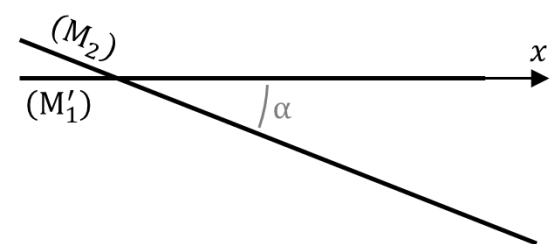
Allure des franges : rectilignes (« franges d'égale épaisseur »)

Localisation des franges : sur les miroirs (dont on forme l'image grâce à une lentille convergente)

Faisceau entrant : parallèle (source au foyer d'une lentille convergente)

Attention : sur l'image ci-contre, les rayons issus de la source ne sont pas les mêmes que ceux arrivant sur l'écran.

III.2 – Différence de marche



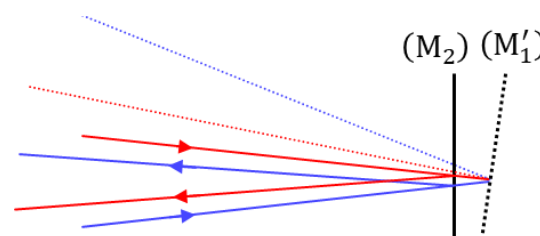
Le schéma équivalent ci-contre montre la trajectoire de deux rayons, réfléchis sur les miroirs dont l'angle relatif α a été extrêmement exagéré.

L'éclairage étant parallèle, les rayons sont supposés en incidence normale sur (M_1), ce qui permet d'écrire :

La différence de marche varie linéairement avec l'abscisse x le long de la zone d'observation : le résultat est analogue aux fentes d'Young.

Remarque : lors de la manipulation du Michelson en coin d'air, rien n'indique l'angle du miroir. La formule n'est donc pas utile pour vérifier l'allure des franges, si ce n'est qu'on retrouve bien une expression qui ne dépend que de x , donc invariante par translation selon y , donc que les figures d'interférences sont bien des franges alignées selon Oy (et non des anneaux).

L'expression de la différence de marche permet de comprendre les règles d'utilisation du Michelson en coin d'air. Sur l'écran, on souhaite réunir au même point tous les rayons ayant subi la même différence de marche, c'est-à-dire tous les rayons ayant subi une réflexion au point x . Puisque tout se passe comme si le point x se comportait comme une source (voir image ci-contre), on doit en faire l'image par une lentille convergente.



En effet, si on reprend le schéma équivalent ci-dessus, les rayons en qui ont subi une petite différence de marche divergent comme s'ils avaient été émis par une source située au niveau des miroirs : on doit utiliser une lentille pour réunir ces deux rayons en un seul point de l'écran d'observation, c'est-à-dire faire l'image du miroir par une lentille convergente.

III.3 – Utilisation en lumière blanche

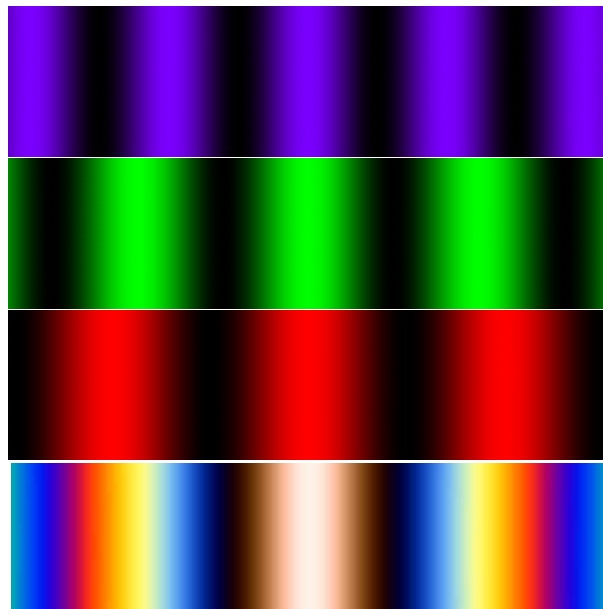
L'interféromètre de Michelson en coin d'air est surtout utilisé pour observer un phénomène particulièrement joli et délicat à obtenir : l'observation des franges colorées en lumière blanche.

L'ordre d'interférence entre deux rayons réfléchis au point x s'écrit : $p = 2\alpha x/\lambda$. Ainsi, chaque longueur d'onde de la lumière blanche créera des franges d'interférences décalées par rapport aux autres.

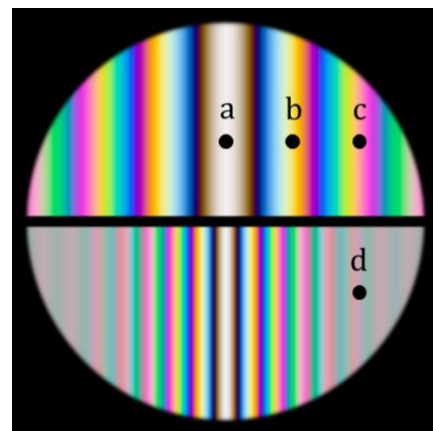
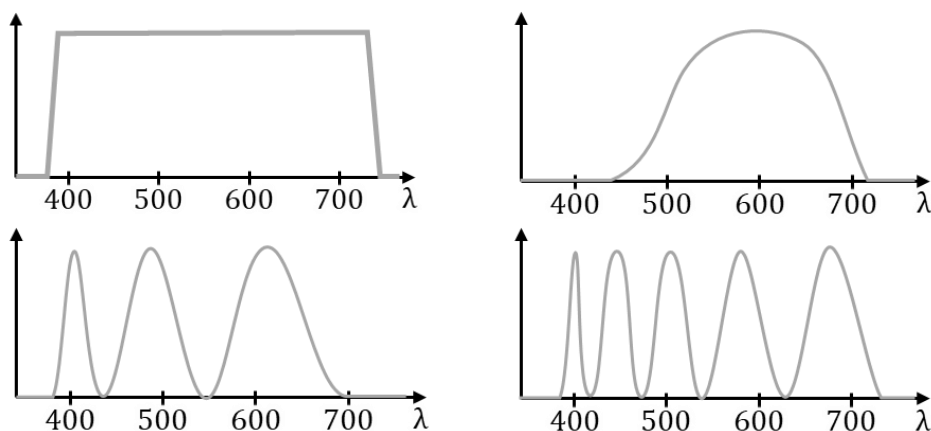
On représente ci-dessous l'allure des franges obtenues pour quelques longueurs d'ondes, $\lambda \simeq 440 \text{ nm}$, $\lambda \simeq 540 \text{ nm}$ et $\lambda \simeq 640 \text{ nm}$.

Puisque toutes ces longueurs d'ondes sont présentes dans la lumière blanche de la source, elle se superposent en intensité sur l'écran : puisqu'elles sont décalées, cela forme une alternance de diverses couleurs, issues de la superposition en intensité des franges de couleurs.

Si on déplace un spectromètre en divers points des franges, on obtient donc un spectre composé de raies, appelé « **spectre cannelé** » : il contient toutes les longueurs d'ondes correspondantes aux franges de couleurs présentes à l'endroit où est placé le spectromètre.



On représente ci-dessous le spectre approximatif obtenu en plaçant un spectromètre en différents points de la figure d'interférence en lumière blanche.



Lorsque la distance au centre augmente, le spectre est toujours « cannelé », mais ces pics sont de plus en plus fins, si bien qu'il devient impossible pour l'œil humain de distinguer cet ensemble de longueurs d'onde de la lumière blanche originale : les raies de couleur laissent place à une couleur blanche, appelée « **blanc d'ordre supérieur** » (de même couleur, mais moins lumineux que la frange centrale, dont la teinte est parfois appelée « **teinte plate** »).