

## Chap.4 – Doc principal

# Division d'amplitude : interféromètre de Michelson

### **1. Description du dispositif**

### **2. Schémas équivalents du Michelson**

- 2.1. Schémas équivalents : lame d'air, coin d'air
- 2.2. Positions des sources ponctuelles secondaires
- 2.3. Source ponctuelle : allure des franges en 3D

### **3. Lame d'air en source étendue (division d'amplitude)**

- 3.1. Localisation des franges à l'infini (constaté expérimentalement)
- 3.2. Ordre d'interférence  $p(M)$  en un point de l'écran
- 3.3. Figure d'interférence : « anneaux d'égale inclinaison »
- 3.4. Interférences en lumière blanche
- 3.5. Réglages en TP pour obtenir des interférences en lame d'air

### **4. Coin d'air en source étendue (division d'amplitude)**

- 4.1. Localisation des franges sur les miroirs (constaté expérimentalement)
- 4.2. Ordre d'interférence  $p(M)$  en un point de l'écran
- 4.3. Figure d'interférence : « franges d'égale épaisseur »
- 4.4. Interférences en lumières blanche
- 4.5. Réglages en TP pour obtenir des interférences en coin d'air

### **1. Description du dispositif**

L'interféromètre de Michelson est un **dispositif à division d'amplitude**. Il a été inventé par Michelson et Morley en 1887, pour mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à « l'éther », supposé être (à l'époque) le milieu matériel de propagation des ondes électromagnétiques.

L'expérience ne put mettre ce mouvement relatif en évidence. Une façon d'interpréter ce résultat est de supposer que la vitesse de la lumière est invariante par changement de référentiel galiléen. C'est aujourd'hui un des postulats de la relativité restreinte.

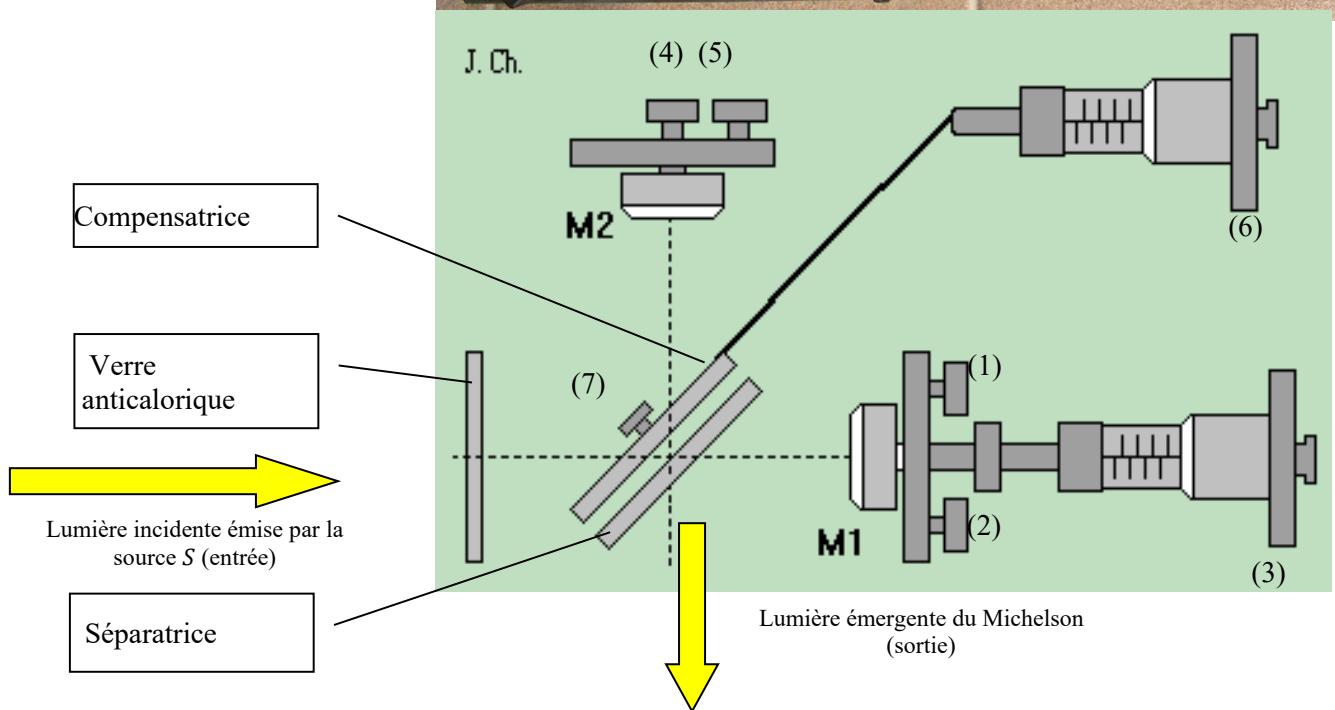
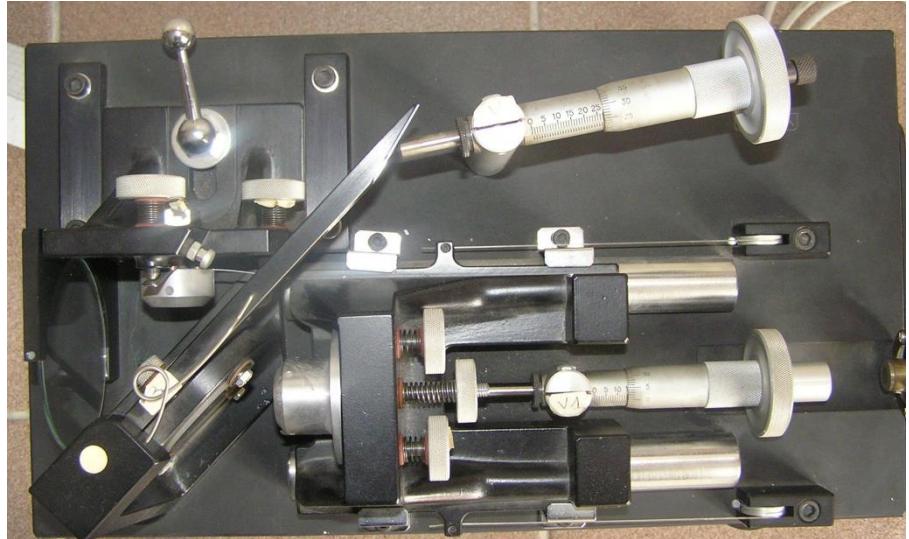
Cet interféromètre est toujours d'actualité. On l'utilise actuellement pour détecter les ondes gravitationnelles : détecteur Virgo en Italie, Ligo aux USA. En TP, nos interféromètres ont une taille de l'ordre du mètre. Pour détecter les ondes gravitationnelles, les interféromètres utilisés mesurent plusieurs... kilomètres.

***L'intérêt du Michelson est d'obtenir des franges très lumineuses, en étant éclairé par une source étendue.***

C'est un très gros avantage sur les dispositifs à division du front d'onde, dont on a vu (fentes d'Young avec source étendue) qu'ils ne peuvent pas donner de franges lorsque la source est trop large.

On va tout de même commencer ce chapitre en considérant une source ponctuelle monochromatique. Nous passerons ensuite au cas d'une source polychromatique. Enfin, on verra que *presque* tous les résultats pourront être généralisés au cas d'une source étendue (i.e. non ponctuelle).

Les photos ci-dessous représentent un des Michelson de la salle de TP. Les autres lui ressemblent beaucoup.



On distingue :

- trois lames : anticalorique, séparatrice (SP) et compensatrice (C), dont le rôle sera vu plus loin
- **deux miroirs ( $M_1$ ) et ( $M_2$ )**
- différentes vis de réglage :
  - (1) et (2) : **vis de rotation rapide**
  - (4) et (5) : **vis de rotation lente**
  - (3) : **vis de chariotage** de ( $M_1$ ), permettant sa translation (suivant l'horizontale sur le schéma)
  - (6) et (7) : réglage en rotation de la compensatrice.

C'est un appareil précis, couteux et très délicat ; on le manipulera avec le plus grand soin, en évitant toujours de toucher les parties optiques (verres et miroirs).

Une fois le dispositif préréglé, on n'agit plus que :

- sur la vis (3) pour translater  $M_1$
- sur les vis (4) et (5) pour incliner  $M_2$

#### Schéma simplifié de l'interféromètre

*On ne gardera que les miroirs  $M_1$ ,  $M_2$  et la séparatrice (supposée d'épaisseur nulle)*

## 2. Schémas équivalents du Michelson

Dans cette partie, on considère que la source qui éclaire le Michelson est *ponctuelle*.

### 2.1. Schémas équivalents : lame d'air, coin d'air

A l'œil, les miroirs  $M_1$  et  $M_2$  apparaissent comme étant parfaitement perpendiculaire. Les écarts à la perpendicularité sont de l'ordre du dixième de degré.

Il existe deux réglages possibles :

- les deux miroirs sont rigoureusement perpendiculaires (montage « lame d'air »)
- l'écart à la perpendicularité existe, représenté par un angle  $\alpha$  (montage « coin d'air »)

#### Réglage lame d'air

##### ➤ Activité 1 : Construction du schéma équivalent lame d'air

*Remarques* : L'épaisseur  $e$  se règle grâce à la vis (3), qui permet de translater  $M_1$  en avant ou en arrière. Il ne faut pas que l'épaisseur de la lame soit trop grande, sinon on verra que la condition  $|\delta| < L_c$  peut ne plus être vérifiée.

#### Réglage coin d'air

On suppose que les distances entre la séparatrice et chaque miroir sont (quasiment) égales

##### ➤ Activité 2 : Construction du schéma équivalent coin d'air

*Remarques* : Une fois le Michelson préréglé, l'inclinaison  $\alpha$  du coin d'air se règle avec les vis (4) et (5). Avant de réaliser le réglage coin d'air, il vaut mieux que la distance entre  $M_2$  et  $M_1'$  soit quasiment nulle.

#### Définition du « contact optique »

*On dit que le Michelson « est au contact optique » lorsque  $M_1'$  et  $M_2$  sont confondus :  
la lame d'air est d'épaisseur nulle  
et le coin d'air est d'angle  $\alpha$  nul*

### 2.2. Positions des sources ponctuelles secondaires

##### ➤ Activité 3 : Construction des sources secondaires ★

En division d'amplitude :

- soit on travaille avec la sources primaire et les schémas équivalents (lame d'air ou coin d'air)
- soit on travaille avec les sources secondaires

Ne pas mélanger les deux situations.

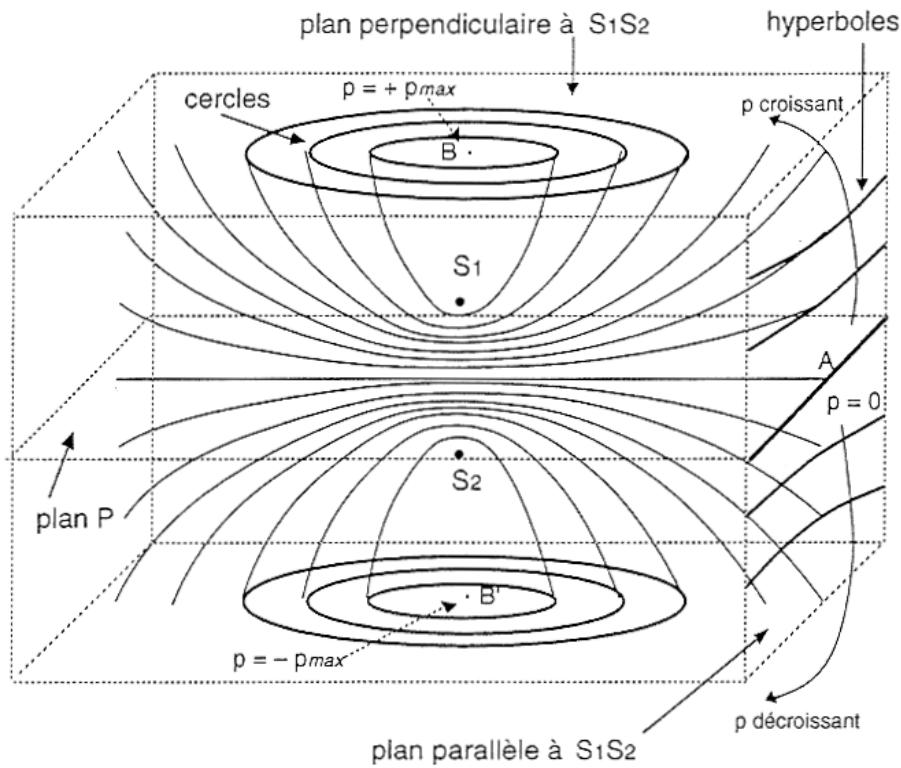
Contrairement aux fentes d'Young les chemins optiques «  $(SS_1)$  et  $SS_2)$  » *n'ont donc aucune signification*.

### 2.3. Source ponctuelle : allure des franges en 3D

Ci-dessous sont représentées les surfaces d'égal éclairage, obtenues avec deux sources secondaires issues d'une **source primaire ponctuelle**.

En plaçant un écran *n'importe où dans le champ d'interférences*, on peut observer des franges bien contrastées. Les interférences sont dites **délocalisées**.

On verra qu'avec **une source primaire étendue, ce n'est plus vrai**.



Remarque : L'interféromètre de Michelson éclairé par une source ponctuelle  $S$  donne des interférences délocalisées. On peut remarquer qu'il agit alors comme un diviseur de front d'onde...

Ci-après, on étudie le Michelson éclairé par une source étendue : les franges **ne sont plus délocalisées**. Elles ne sont visibles que sur un plan localisé dans l'espace. On peut montrer que ces figures sont alors effectivement obtenues par division d'amplitude.

### 3. Lame d'air en source étendue (division d'amplitude)

#### 3.1. Localisation des franges à l'infini (constaté expérimentalement)

Eclairé par une source étendue, on constate expérimentalement que le Michelson réglé en lame d'air donne des interférences bien contrastées en un plan situé en à l'infini. On l'admettra théoriquement.

##### Utilisation classique

*En lame d'air, et éclairé par une source étendue, le Michelson donne des franges localisées à l'infini.*

##### Utilisation non-classique

*En lame d'air, et éclairé par une source ponctuelle, le Michelson donne des franges délocalisées.*

Remarque :

- Dans le 1<sup>er</sup> cas, on peut montrer que le Michelson est bien utilisé en tant que diviseur d'amplitude : les RL qui se croisent en un point  $M$  à l'infini sont issus d'un même rayon père
- Dans le 2<sup>e</sup> cas, on peut montrer que le Michelson réalise alors une division d'amplitude : les RL qui se croisent en un point  $M$  à distance finie sont issus de deux rayons pères différents

### 3.2. Ordre d'interférence $p(M)$ en un point de l'écran

#### ➤ Activité 4 : Calcul de l'ordre d'interférence en lame d'air ★

### 3.3. Figure d'interférence : « anneaux d'égale inclinaison »

#### ➤ Activité 5 : Propriétés de la figure d'interférences en lame d'air ★

NB : Sur le dessin utilisé, on vérifie facilement que l'extension spatiale de la source ne brouille pas les franges.

**En lame d'air, une frange correspond à une même valeur de l'angle  $i$  : on parle d'anneaux d'égale inclinaison**

*On s'approche du contact optique en faisant rentrer les anneaux au centre de l'écran.*

Vérifions ces affirmations avec cette animation : <https://xyod.github.io/anim-ophy/>

Remarque :  $\mathbf{k} = \mathbf{E}[\mathbf{p}_c]$ . La courbe expérimentale  $\left(\frac{r_n}{r_1}\right)^2 = \mathbf{f}(\mathbf{n})$  ainsi que la mesure de  $\mathbf{r}_1$  donnent accès à  $\mathbf{p}_c$  et  $\mathbf{k}$ . Si  $\mathbf{p}_c$  est entier, alors  $\mathbf{k} = \mathbf{p}_c - \mathbf{1}$  et  $\left(\frac{r_n}{r_1}\right)^2 = \mathbf{n}$ .

**Au contact optique, l'éclairement est uniforme sur l'écran : on parle de teinte plate.**

Remarque :

En pratique, il est difficile d'atteindre précisément le contact optique en lumière monochromatique. On approche cependant assez près du contact optique, et on observe une grosse tâche finale.

Cf. la vidéo à 26° minute : [Vidéo Michelson YTube](#)

Pour atteindre plus précisément le contact optique, il faut utiliser la lumière blanche.

### 3.4. Interférences en lumière blanche

#### ❖ Essayer d'anticiper ce que l'on doit voir

A vérifier sur la vidéo entre 28min37 et 30min20 : [Vidéo Michelson YTube](#)

### 3.5. Réglages en TP pour obtenir des interférences en lame d'air

**Réglage faisceau incident** : Il faut le former de manière à avoir une large gamme « d'angles  $i$  ». Pour cela, il suffit de former l'image du filament sur le miroir  $\mathbf{M}_1$  : au niveau des miroirs  $\mathbf{M}_1'$  et  $\mathbf{M}_2$ , le faisceau est le plus convergent possible, et contient donc de nombreuses valeurs de  $i$  différentes.

**Réglage du dispositif de projection sur l'écran** : Une lentille CV avec l'écran dans son plan focal. Plus sa focale est grande, plus la taille de la figure d'interférence sera grande, mais elle sera d'autant moins brillante (car la même énergie est alors répartie sur une plus grande surface).

A suivre sur la vidéo entre 16min45 et 21min43 : [Vidéo Michelson YTube](#)

## 4. Coin d'air en source étendue (division d'amplitude)

### 4.1. Réglages en TP pour obtenir des interférences en coin d'air

**Réglage faisceau incident** : Il faut le former de manière à éclairer les miroirs sur toute leur largeur. Pour cela, il suffit de placer la source dans le plan focal objet d'une lentille CV.

**Réglage du dispositif de projection sur l'écran** : Une lentille CV pour projeter l'image de  $M_2$  sur l'écran. Il est essentiel de vérifier que *la distance entre  $M_2$  et l'écran est supérieure à  $4f'$* , sinon il est impossible de former l'image sur l'écran (cf. TP méthode de Bessel en focométrie).

#### Passage de lame d'air à coin d'air

*Généralement, on commence par visualiser les interférences en lame d'air, puis on passe en coin d'air.  
En lame d'air, il faut approcher au plus près le contact optique en faisant rentrer les anneaux, jusqu'à ne plus pouvoir observer qu'une tâche (un anneau central tellement étendu qu'on ne perçoit plus les bords).*

*On modifie alors le réglage du faisceau incident en amont du Michelson, ainsi que le réglage de projection en aval du Michelson (focale et position de la lentille de projection).*

A suivre sur la vidéo entre 30min58 et 32min43 : [Vidéo Michelson YT](#)

### 4.2. Localisation des franges sur les miroirs (constaté expérimentalement)

Eclairé par une source étendue, on constate expérimentalement que le Michelson réglé en coin d'air donne des interférences bien contrastées en un plan situé sur le miroir  $M_2$ . Plus précisément, les franges sont localisées « à proximité du coin d'air », mais il est plus pratique de penser à  $M_2$ . On admettra tout cela théoriquement.

#### Utilisation classique

*En coin d'air, et éclairé par une source étendue, le Michelson donne des franges localisées sur  $M_2$ .*

#### Utilisation non-classique

*En coin d'air, et éclairé par une source ponctuelle, le Michelson donne des franges délocalisées.*

Pour observer les franges sur un écran, il faut projeter l'image de  $M_2$  sur l'écran grâce à une lentille CV.

#### Projection des franges sur un écran : attention au critère $D > 4f'$

*La distance entre  $M_2$  et l'écran doit être supérieure à  $4f'$ , sinon aucune position de la lentille ne permet d'obtenir l'image sur l'écran.*

### 4.3. Ordre d'interférence $p(M)$ en un point du plan de localisation ( $M_2$ )

Pour simplifier cette étape du calcul, il vaut mieux raisonner avec un rayon lumineux issu de  $S'$  et perpendiculaire à un des miroirs. L'idée clef est que l'on peut assimiler localement le coin d'air à une lame d'air... le coin d'air apparaît comme une lame d'air d'épaisseur variable quand on se déplace le long des miroirs.

➤ Activité 6 : Calcul de l'ordre d'interférence en coin d'air ☀

#### 4.4. Figure d'interférence : « franges d'égale épaisseur »

##### ➤ Activité 7 : Propriétés de la figure d'interférences en coin d'air ★



*En coin d'air, une frange correspond à une valeur de l'épaisseur du coin : on parle de **franges d'égale épaisseur***

*On s'approche du contact optique en écartant les franges.*

En TP, les franges ne sont pas observées directement dans leur plan de localisation, mais sur un écran sur lequel est projeté l'image des franges, via une lentille convergente.

#### 4.5. Interférences en lumières blanche

❖ Essayer d'anticiper ce que l'on doit voir.

A vérifier sur la vidéo entre 34min30 et 34min45 : [Vidéo Michelson YTube](#)

Lorsque l'on s'éloigne de l'arête du coin, les franges de différentes couleurs se décalent les unes par rapport aux autres. Lorsque l'on est trop loin de l'arête, le mélange de couleur est tel que l'œil perçoit une teinte blanche. Mais ce n'est pas du « vrai blanc », certaines longueurs d'onde sont absentes.

On peut visualiser les longueurs d'onde manquante via un spectromètre. Au point  $M$  considéré sur l'écran, il existe au moins une couleur pour laquelle on est sur une frange sombre, cette longueur d'onde est donc absente de la lumière que l'on voit. Au spectromètre, on observe des sortes de cannelures ( $\approx$ « franges en longueur d'onde »)

***En lumière blanche, lorsque la différence de marche est trop importante, on voit du blanc d'ordre supérieur.***  
***Le spectre en longueur d'onde est alors qualifié de **spectre cannelé**.***

A observer sur la vidéo entre 37min07 et 37min46 : [Vidéo Michelson YTube](#)

Commentaire final : rôle de la compensatrice

La séparatrice est une lame de verre, dont la face d'entrée est métallisée, pour obtenir un coefficient de réflexion en puissance de 0,5. Seule cette face est utile. Mais la séparatrice possède une certaine épaisseur, d'indice  $n \neq 1$ . Cette partie de la séparatrice n'est pas traversée de la même façon par les deux faisceaux formés par le Michelson. Elle introduit donc une différence de marche parasite. La compensatrice est une lame de verre identique à la séparatrice, mais sans face métallisée. Insérée correctement, elle permet de compenser la ddm parasite.

#### Expressions par cœur des ddm (dans le « vide »)

*On pourra retenir par cœur les expressions des ddm établies dans ce chapitre :  
(avec dessin à l'appui, pour définir les paramètres  $e$ ,  $i$ ,  $\alpha$  et  $x$ )*

$$\text{Lame d'air : } \delta = 2e \cos(i)$$

$$\text{Coin d'air : } \delta = 2ax$$

Attention : ce sont là les valeurs absolues de la ddm :

- le signe de la ddm dépend de la convention choisie  $\delta_{21}$  ou  $\delta_{12}$

- Une fois la convention choisie, si l'on passe le contact optique en chariotant, la ddm change de signe

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.4. Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson</b>	
<b>Interféromètre de Michelson équivalent à une lame d'air éclairée par une source spatialement étendue.</b>  Localisation des franges. Franges d'égale inclinaison.	Justifier les conditions d'observation des franges d'égale inclinaison, le lieu de localisation des franges étant admis. Établir et utiliser l'expression de l'ordre d'interférences en fonction de l'épaisseur de la lame, l'angle d'incidence et la longueur d'onde.  <b>Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation adaptées à l'utilisation d'un interféromètre de Michelson en lame d'air.</b> <b>Mesurer l'écart en longueur d'onde d'un doublet et la longueur de cohérence d'une radiation.</b> <b>Interpréter des observations faites en lumière blanche avec l'interféromètre de Michelson en configuration lame d'air.</b>
<b>Interféromètre de Michelson équivalent à un coin d'air éclairé par une source spatialement étendue.</b>  Localisation des franges. Franges d'égale épaisseur.	Justifier les conditions d'observation des franges d'égale épaisseur, le lieu de localisation des franges étant admis. Utiliser l'expression donnée de la différence de marche en fonction de l'épaisseur pour exprimer l'ordre d'interférences.  <b>Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation adaptées à l'utilisation d'un interféromètre de Michelson en coin d'air.</b> <b>Caractériser la géométrie d'un objet ou l'indice d'un milieu à l'aide d'un interféromètre de Michelson.</b> <b>Interpréter des observations faites en lumière blanche avec l'interféromètre de Michelson en configuration coin d'air.</b>