

Activité expérimentale - TP cours - Interféromètre de Michelson

Capacités développées ou évaluées lors de ce TP

- Observer les manipulations d'un interféromètre.
- Observer et interpréter les figures d'interférences.

Cette séance vous permettra de vous familiariser avec l'interféromètre de Michelson. Vous allez observer différentes figures d'interférences générées avec cet appareil, le but est de comprendre le rôle de chaque partie et comment sont obtenues les figures d'interférence. Dans un prochain TP, vous allez réaliser ces manipulations vous-mêmes : il est important d'apprendre et de retenir tout ce qui est vu dans ce TP pour rendre vos manipulations efficaces.

I) Un peu d'histoire...

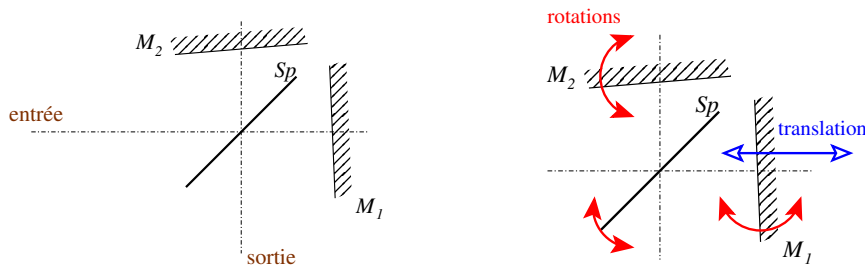
L'interféromètre de Michelson a été mis au point par Albert Abraham Michelson et lui a permis (entre autres choses) d'invalider la théorie de l'éther (expérience de Michelson-Morley), l'un des chemins importants vers la théorie de la relativité restreinte.

De nombreux types de mesures sont faisables avec cet instrument. Il existe aussi des dispositifs interférentiels dérivés de celui-ci. On peut par exemple citer le cas de gravimètres absolus, ainsi que le projet VIRGO de détection d'ondes gravitationnelles.

II) Schéma de principe de l'interféromètre

1) Schéma théorique (sans compensatrice)

L'interféromètre *théorique* est constitué de deux miroirs plans (M_1) et (M_2) et d'une lame de verre (S_p) plane semi-réfléchissante appelée **séparatrice**. Celle-ci divise le faisceau incident (arrivant de l'entrée) en deux parts égales grâce à un traitement particulier de surface. Le but d'une telle division est de pouvoir produire des interférences à deux ondes avec le meilleur contraste possible avec observation côté sortie.



Les deux miroirs (M_1) et (M_2), ainsi que (S_p), sont **orientables par rotations bi-axes**. Le miroir (M_1) est **translatable** par une opération dite de **chariotage** (car il est monté sur un chariot).

On suppose pour le moment que (S_p) est infiniment fine.

2) Construction des trajets des rayons dans l'interféromètre

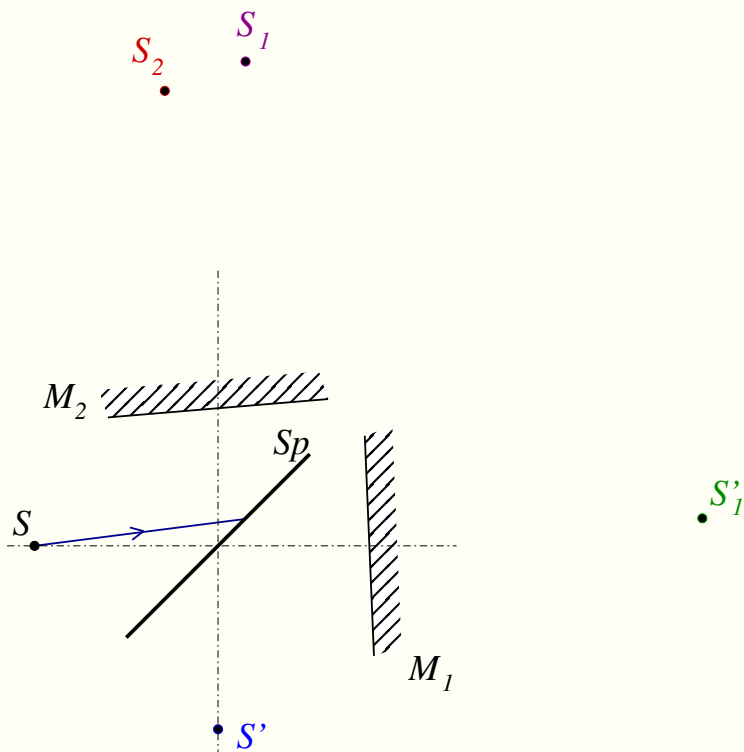
On pourrait se dire que le trajet des rayons est compliqué à représenter dans un tel système *mais ce n'est pas le cas si l'on pense à exploiter les points images relatifs à chaque réflexion*.

Soit un point source S donné. Définissons alors des points issus de symétries planaires comme suit :

$$\begin{array}{l|l} \text{— } S'_1 = \text{Sym}_{M_1}(S) & \text{— } S' = \text{Sym}_{S_p}(S) \\ \text{— } S_1 = \text{Sym}_{S_p}(S'_1) & \text{— } S_2 = \text{Sym}_{M_2}(S') \end{array}$$

Exercice 1

Utiliser les points précédemment définis pour tracer des rayons dans l'interféromètre sur le schéma suivant :



Explications :

Remarque : en colle ou en devoir, si l'énoncé veut une telle construction, les points ne sont pas donnés et sont à construire par symétrie axiale.

3) Propriété de phase

On admet la propriété suivante, fondamentale pour comprendre les figures observées :

Propriété des sources secondaires

Les points S_1 et S_2 sont des sources secondaires en phase dans le modèle théorique simplifié de l'interféromètre de Michelson.

Cela justifie les figures d'interférences que l'on va décrire et observer dans la suite.

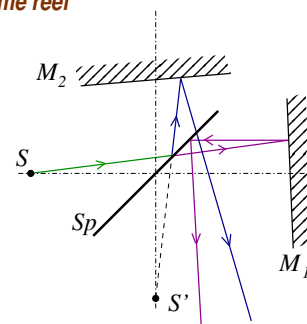
4) Schéma équivalent à deux miroirs fictifs

Les rayons dans l'interféromètre peuvent sembler compliqués en raison des cassures à chaque réflexion. Il y a moyen de réaliser un schéma fictif « plié » plus simple produisant les mêmes interférences dans le champ d'interférences d'origine :

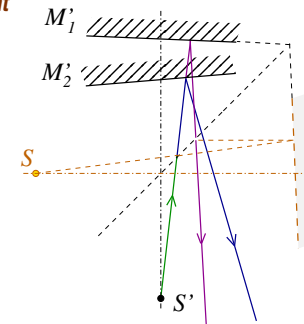
- soit S' l'image de la source d'origine par la séparatrice ;
- soit M'_1 le miroir fictif image de M_1 par la séparatrice et transparent aux rayons du bras (2) ;
- soit M'_2 le miroir fictif correspondant à M_2 , transparent aux rayons du bras (1).

On a alors l'équivalence, du point de vue des rayons sortants, entre les deux dispositifs suivants :

Système réel

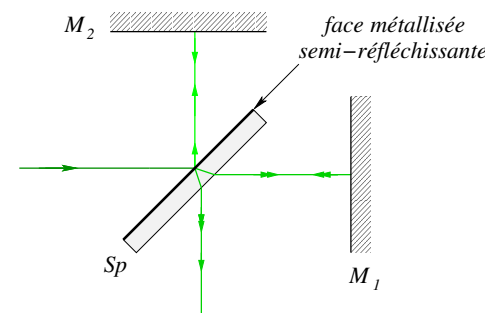


Système équivalent à deux miroirs

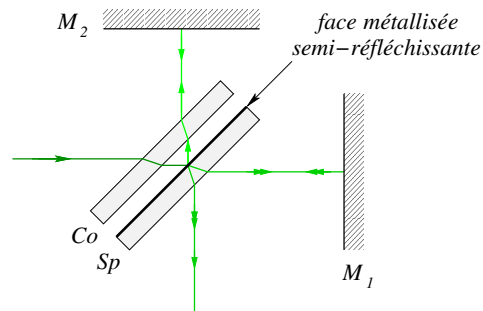


5) Nécessité pratique de la compensatrice

En pratique, la séparatrice n'est pas une lame d'épaisseur nulle ! C'est une lame de verre à faces parallèles dont l'une est rendue semi-réfléchissante par dépôt d'une mince couche métallique.



On voit sur la figure que le faisceau du bras (1) passe trois fois dans l'épaisseur de verre de la séparatrice tandis que le faisceau du bras (2) n'y passe qu'une seule fois ! L'existence de l'épaisseur de la séparatrice introduit donc une différence de marche qui dépend de l'indice du verre. Cela complique franchement l'analyse des interférences. On appelle **compensatrice** (C_o) la lame de verre identique à la séparatrice (S_p) (mais sans couche semi-réfléchissante) placée dans l'interféromètre permettant de compenser *au mieux* le chemin optique dans (S_p). Pour cela, (C_o) et (S_p) doivent être parallèles.



On voit bien sur la figure que l'opération de compensation est bien réalisée (les chemins optiques dans les épaisseurs de verre sont identiques pour les bras (1) et (2)).

6) Autres aspects pratiques

Pour approcher le modèle de l'interféromètre idéal, il faut que les différentes pièces optiques qui composent l'appareil soient de qualité « interférométrique ». En effet, les miroirs et les lames ne doivent pas déformer les surfaces d'onde, ce qui impose **une planéité et un polissage très précis**, avec une tolérance meilleure que $\lambda/10$ pour les irrégularités résiduelles (pour les appareils usuels).

De même, la sensibilité des interférences lumineuses correspond à des déplacements qui sont inférieurs à une longueur d'onde du domaine optique, soit typiquement 100 nm. Il faut donc une **mécanique de précision**, qui permette de régler l'orientation des miroirs de façon à la fois sensible et stable. Il est également nécessaire que la translation (chariotage) du miroir soit très progressive et que le miroir conserve une orientation rigoureusement constante au cours de ce déplacement.

Il faut par ailleurs **éviter toute vibration intempestive**, qu'on pourrait par exemple créer en s'appuyant sur la table de manipulation et qui risquerait évidemment de perturber la figure d'interférences obtenue (ou la brouiller).

L'ensemble de ces contraintes fait qu'un interféromètre de Michelson de bonne qualité est un **matériel coûteux** et fragile. Il faut donc le manipuler avec précaution, en prenant soin de ne pas abîmer les mouvements mécaniques et en ne touchant **en aucun cas** avec les doigts les pièces optiques (miroirs et lames).

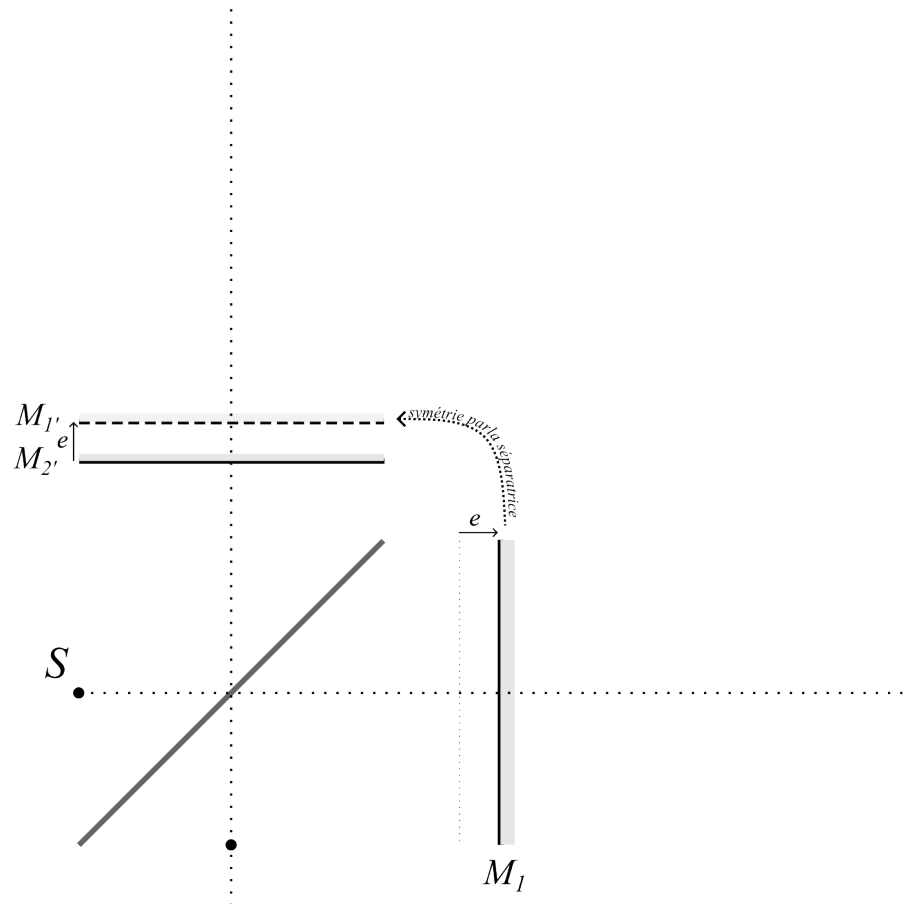
III) Utilisation en lame d'air, anneaux d'égales inclinaison

1) Schéma équivalent en lame d'air - sources secondaires

On dit que l'interféromètre de Michelson est en **lame d'air** (à faces parallèles) lorsque les miroirs fictifs M'_1 et M'_2 sont parallèles.

On note en général e l'épaisseur de la lame d'air.

Complétons les sources fictives pour parvenir aux deux sources secondaires S_1 et S_2 avant projection.



On constate qu'en lame d'air, les sources fictives sont sur l'axe optique et séparées d'une distance $2e$ (à savoir !).

2) Localisation des anneaux et conditions d'observation

On admet une propriété difficile à démontrer (donc admise...), mais fondamentale pour la compréhension du montage :

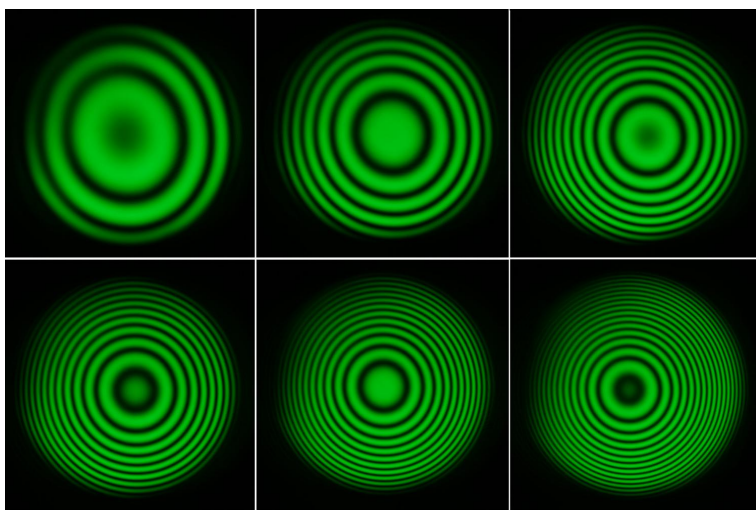
Localisation des interférences avec source étendue

En configuration de lame d'air, lorsque la source primaire est une source large, les interférences sont localisées **à l'infini**.

Ceci appelle une conséquence immédiate : pour observer les interférences à la sortie d'un interféromètre réglé en lame d'air, il est nécessaire d'utiliser une lentille de projection permettant de projeter ces interférences sur un écran à distance finie, dans le plan focal image de la lentille convergente de projection.

D'autre part, pour obtenir des anneaux le plus lumineux possible avec le plus d'indici-
dences différentes possibles, on a intérêt à concentrer la lumière sur les miroirs. Cela se fait à l'aide d'une lentille de courte focale (condenseur).

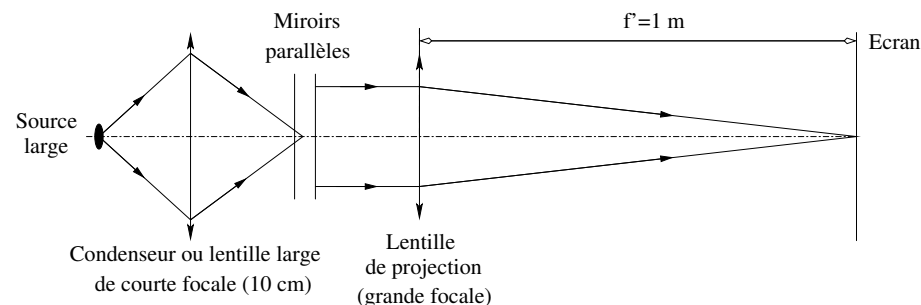
Les franges d'interférences **à l'infini** d'un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air s'appellent **anneaux d'égale inclinaison**¹.



Manipulons...

Observons les anneaux... et le montage

Le dispositif d'observation pratique des anneaux d'égale inclinaison est le suivant :



3) Différence de chemin optique en observation à l'infini

a) *Par calcul direct*

1. Ainsi nommés car chaque anneau brillant est généré par des rayons partant des sources secondaires avec une inclinaison i fixée

b) En utilisant les sources secondaires

Gros piège !

Comme $\delta = 2e \cos i$ est **maximale pour $i = 0$ et est inférieure pour $i \neq 0$, plus on s'éloigne du centre de l'écran, plus l'ordre décroît**. Contrairement au cas des trous d'Young, la différence de chemin optique est **maximale** au centre de l'écran.

L'ordre d'interférence du k-ième anneau brillant est donc donné par : $p_k = p_c - k$,

soit $\delta_k = 2e - k\lambda$.

Or $\delta_k = 2e \cos i_k \approx 2e \left(1 - \frac{i_k^2}{2}\right)$ à l'ordre 2 en i_k .

De plus, i_k étant faible, on a $i_k \approx \tan i_k = \frac{r_k}{f'}$. Finalement :

$$2e \left(1 - \frac{r_k^2}{2f'^2}\right) = 2e - k\lambda$$

$$\frac{r_k^2 e}{f'^2} = k\lambda$$

$$r_k = \sqrt{\frac{k\lambda}{e}} f'$$

On remarque que les rayons ne croissent pas linéairement avec k , mais que, d'après le comportement de la fonction racine carrée, ils croissent « de plus en plus lentement » ce que l'on remarque facilement qualitativement dès que plus de 5 anneaux sont présents.

5) Influence de e sur les anneaux observés, contact optique

Soit un interféromètre de Michelson en configuration lame d'air et éclairé par une source large. Alors,

- les anneaux d'égale inclinaison **rentrent dans le centre** quand on se **rapproche** du contact optique (diminution de l'épaisseur de lame d'air) ;
- les anneaux d'égale inclinaison visibles sur l'écran sont **plus grands et moins nombreux** quand on se **rapproche** du contact optique.

Exercice 2

Justifier les deux propriétés précédentes.

4) Rayon des anneaux en lumière monochromatique

Les anneaux que nous venons d'observer sont de rayons assez variables en fonction de la configuration de l'interféromètre.

Pour simplifier le raisonnement, on va considérer que les deux rayons issus de S_1 et S_2 interfèrent constructivement au centre de l'écran, donc pour $i = 0$. L'ordre au centre $p_c = \frac{2e}{\lambda_0}$ est donc supposé entier (on peut le supposer non entier, ce qui est plus général, mais un peu plus compliqué). Le centre de l'écran est donc d'intensité maximale.

Nous allons calculer le rayon r_k des autres anneaux brillants (d'intensité maximale). Ils correspondent à des ordres entier, voisins de p_c .



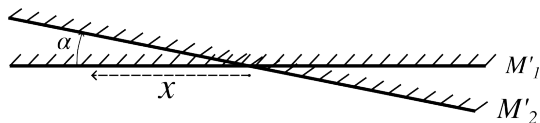
Manipulons...

Lorsque l'on veut se rapprocher du contact optique ($\delta = 0$), on doit traduire le miroir de façon à voir « **rentre** » les anneaux.

IV) Utilisation en coin d'air, franges d'égal épaisseur

1) Schéma équivalent

En coin d'air, les miroirs équivalents sont légèrement inclinés l'un par rapport à l'autre :



Cela est possible grâce aux vis pour faire pivoter chaque miroir autour de certains axes. L'angle entre les deux est extrêmement faible (de l'ordre de la minute d'angle, soit $1/60^\circ$).

2) Localisation des franges et conditions d'observation

On admet pour ce paragraphe un résultat fondamental :

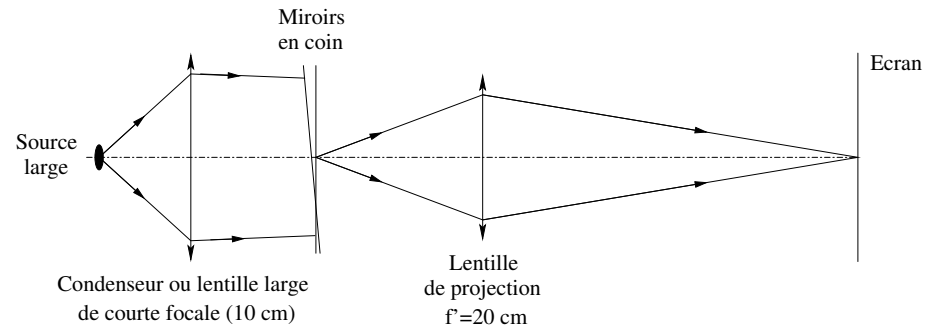
Localisation des interférences en coin d'air

En coin d'air, les interférences sont localisées **au voisinage du coin d'air**, donc **sur les miroirs**.

La conséquence immédiate est que l'on ne peut pas visualiser les interférences du coin d'air comme en lame d'air : il ne faut pas regarder au même endroit !

On doit utiliser une lentille qui **conjugue le plan des miroirs avec un écran**. De plus, une qualité d'image satisfaisante est atteinte lorsque les miroirs sont éclairés uniformément : on va donc éviter d'utiliser un condenseur et garantir plutôt un éclairage uniforme.

Le schéma du montage permettant une bonne observation en coin d'air est donc :



3) Différence de chemin optique en coin d'air

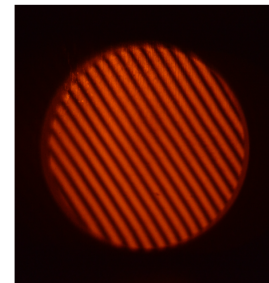
On admet que la différence de chemin optique est simplement donnée par :

$$\delta = 2\alpha x$$

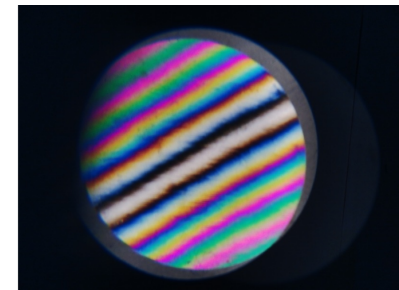
Si α est petit, ce qui est toujours le cas en coin d'air.

4) Observations, interprétations

On observe sur l'écran des franges rectilignes, nommées **franges d'égal épaisseur**². L'interfrange est d'autant plus grande que les miroirs sont peu inclinés (α faible).



Source quasi-monochromatique



Lumière blanche

5) Grandissement optique introduit par la lentille

Entre la lentille et l'écran, il y a un grandissement dû à la lentille.

Exercice 3

Un coin d'air avec $\alpha = 2 \times 10^{-4}$ rad est éclairé par de la lumière verte de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 545$ nm.

1. Calculer l'interfrange i sur le miroir. Commenter l'influence de α et celle de λ .

2. ainsi nommées car chaque frange brillante ou sombre correspondent à une épaisseur donnée du coin d'air

2. Une lentille convergente de focale $f' = 20$ cm est utilisée pour projeter les franges sur un écran situé à 1,0 m de la lentille. Déterminer la distance entre le coin d'air et la lentille, en déduire l'interfrange i' de la figure d'interférence sur l'écran.

6) Observation en lumière blanche, frange achromatique

Lorsque l'on passe en en lumière blanche, on constate une figure d'interférence tout à fait remarquable.

La frange blanche centrale est la frange d'ordre 0. Autour de cette frange, on voit des irisations correspondant à la superposition des systèmes d'interférences des différentes longueurs d'onde de la lumière blanche, puisque, puisque toutes les couleurs y interfèrent constructivement. L'interfrange dépend de la longueur d'onde. Plus loin, les franges ne sont plus visibles. Il s'agit du **blanc d'ordre supérieur** : les interférences sont toujours présentes, mais la superposition de tous les systèmes d'interférences pour toutes les longueurs d'onde du blanc conduit à un brouillage complet. En revanche, en un point quelconque de ce blanc d'ordre supérieur, on voit a un spectre « incomplet » (nommé *spectre cannelé*), puisque certains couleurs interfèrent destructivement en ce point et ne sont donc pas présentes dans le spectre.