

Interféromètres à division d'amplitude. Applications.

Correcteurs : Jacques Bayet¹ et Etienne Thibierge²

Leçon présentée le vendredi 12 octobre 2012

Cette correction reprend et complète les points discutés en classe. J'ai présenté cette leçon à l'oral de l'agrégation 2012. Il va de soi que cette correction s'appuie beaucoup sur ma leçon et les retours que j'en ai eu du jury lors de la confession.

Rapports du jury

- ▷ (2010, 2009) Le calcul des différences de marche doit être effectué aussi simplement que possible, en exploitant au maximum les dépliements de rayons. L'influence de l'extension spatiale de la source sur la figure d'interférences est au cœur de la leçon.
- ▷ (2008) Il est indispensable de développer des applications.
- ▷ (2005) Le Michelson n'est souvent utilisé qu'en lame d'air. Les problèmes de localisation et les détails expérimentaux sont rarement présents, tout comme les applications. On peut, pour cette leçon, admettre que les dispositifs par division du front d'onde ont déjà été étudiés auparavant, ce qui permet au candidat d'entrer tout de suite dans le vif du sujet de la division d'amplitude et de son intérêt.
- ▷ (2004) Si le jury souhaite naturellement une solide illustration expérimentale de la leçon, il ne faut pas la transformer en une succession d'observations purement qualitatives. Cette leçon doit être l'occasion pour le candidat de montrer qu'il sait conduire l'analyse théorique du phénomène expérimental montré.

Commentaires généraux

La leçon présentée répond aux attentes sur le sujet. Tous les points incontournables ont été traités, et les rapports du jury pris en compte.

L'exposé a été conduit à un rythme assez modéré, et manquait un peu de relief. Les messages forts de la leçon n'ont pas suffisamment été mis en avant, et c'est d'autant plus dommage que les questions ont montré qu'ils étaient clairement présents à l'esprit d'Arnaud. Il est important de les faire ressortir très clairement au cours de la leçon, en mettant l'accent dessus à l'oral, et en les écrivant explicitement au tableau.

Le tableau était propre et bien présenté, et l'utilisation de couleurs mettant en avant certains résultats est très appréciée ! En revanche on évitera d'écrire en rouge, qui est peu lisible. Le jaune, le orange ou le bleu clair sont plus efficaces.

Enfin cette leçon demande une bonne maîtrise expérimentale et des expériences soignées, qui ont manqué ici. Il est indispensable de présenter des anneaux bien ronds et bien contrastés, et très recommandé de faire le passage en coin d'air au cours de la leçon (cf. rapport 2005). L'éclairage de l'interféromètre est crucial pour la qualité des figures d'interférences, et ne doit être négligé ni dans les explications théoriques ni dans la réalisation expérimentale.

Retour sur la leçon présentée

Introduction

Le niveau de la leçon a été annoncé (licence 3), ce qui est attendu. Attention, bien qu'étant présenté dans des livres de niveau prépa, le théorème de localisation est explicitement exclu des programmes. Éviter donc d'annoncer un niveau spé.

Les pré-requis annoncés sont bien ciblés, mais incomplets. Il convient d'y ajouter l'optique géométrique, essentielle à l'étude expérimentale, et sur laquelle repose la démonstration du théorème de localisation.

Je pense aussi qu'à ce stade il est déjà bienvenu d'annoncer les idées clés de la leçon, et pas seulement une annonce de plan très formelle.

I) Théorème de localisation

L'objectif du calcul tel que formulé par Arnaud (chercher la surface de contraste maximal) peut prêter à confusion, car la définition du contraste dépend de l'interféromètre (raisons historiques). Une formulation plus précise est de dire que l'on recherche la zone du champ d'interférences dans laquelle la différence de marche ne dépend pas du point de la source (étendue) considéré. Cette zone est en effet particulièrement intéressante, car les différents points de la source y créent des systèmes d'interférences identiques, ne conduisant donc pas à un brouillage mais à une augmentation de la luminosité de la figure.

La démonstration du théorème de localisation est attendue, et a été bien conduite. On se méfiera qu'il y a une erreur de signe dans la démonstration du H-Prépa (facile à repérer à partir d'un schéma, mais prudence !). L'écriture $S_A M_1 - S_B M_1 = d(S_A M_1)$ peut sembler sortie du chapeau si elle n'est pas bien amenée. Pour contourner la difficulté, on peut choisir de faire un développement limité de $S_B M_1$ utilisant $\overrightarrow{S_B M_1} = \overrightarrow{S_B S_A} + \overrightarrow{S_A M_1}$. Cette démarche a aussi l'avantage de montrer que le théorème de localisation est un résultat au premier ordre.

1. jq.bayet@free.fr

2. etienne.thibierge@ens-lyon.fr, <http://perso.ens-lyon.fr/etienne.thibierge>

Pour terminer sur cette partie, il est indispensable d'écrire au tableau non seulement le critère de non-brouillage des franges, mais aussi un énoncé en toutes lettres du théorème de localisation.

II) Interféromètre de Michelson

1/ Description du dispositif

La présentation proposée était claire, et s'appuyait à la fois sur un schéma et l'appareil. Le jour de l'oral, pensez à chercher dans la banque de données un schéma numérisé du Michelson. Vous gagnerez un temps précieux en n'ayant pas à faire de transparent.

En revanche il y avait erreur sur le rôle de la compensatrice. Elle n'est pas là pour compenser une différence de marche constante entre les deux voies, ce qui aurait peu d'intérêt puisqu'on ne mesure que des différences de différence de marche. Le problème vient de la dispersion dans le verre : son indice dépend de la longueur d'onde. Ainsi la différence de marche entre le rayon traversant le verre trois fois et celui qui traverserait le verre une fois dépendrait aussi de la longueur d'onde. En conséquence, lorsque l'on aura réglé l'interféromètre à $\delta = 0$ pour une longueur d'onde, ce ne sera pas le cas pour les autres. L'observation d'interférences en lumière blanche serait donc impossible sans compensatrice. Le réglage du parallélisme entre séparatrice et compensatrice rejoint aussi cette problématique, mais cette fois vis à vis des différents angles d'incidence. La compensatrice permet enfin d'égaliser l'absorption par le verre entre les deux voies, phénomène qui va toujours de pair avec la dispersion.

Pour une présentation complète et concise de l'interféromètre de Michelson, je vous suggère la lecture du Sextant.

L'introduction du schéma équivalent était claire, et les deux configurations bien présentées. Les noms « lame d'air » et « coin d'air » sont d'usage courant, mais certaines personnes utilisent aussi la dénomination « lame d'air à faces parallèles » et « lame d'air à faces non parallèles ».

2/ Lame d'air

La recherche du lieu de localisation doit faire explicitement appel au théorème de localisation qu'on vient de démontrer. C'était plutôt bien fait ici. De même, le calcul de différence de marche utilisant au maximum le dépliement est le plus simple, et le choix de le privilégier est le bon. Par contre, les questions d'éclairage de l'interféromètre ne doivent pas être oubliées.

L'illustration expérimentale doit être plus soignée, les anneaux n'étaient pas du tout assez contrastés. La position du condenseur devant la lampe au sodium ne donnait pas suffisamment d'angles d'incidence, et la présence de bandes rectilignes moins contrastées devant les anneaux est le signe d'un mauvais parallélisme des miroirs (cf. H-Prépa pour l'explication du phénomène).

Concernant les applications, résumer l'expérience de Michelson et Morley est une bonne idée. L'application à la spectroscopie est bien choisie également, et la résolution du doublet du sodium se fait simplement. En revanche

l'illustration expérimentale ne pouvait être très convaincante, faute d'anneaux bien contrastés.

Attention aux phrases malheureuses comme « on ne peut pas mesurer la longueur de cohérence temporelle de la lumière blanche avec un Michelson » : c'est faux ! Bien qu'elle soit plus petite que la précision du vernier, il est tout à fait possible de fabriquer un autre étalon à l'aide d'une source monochromatique (laser ou lampe QI + filtre interférentiel), et d'en déduire la longueur de cohérence de la QI. De même seuls quelques lasers monomodes stabilisés en fréquence ont « une longueur de cohérence temporelle de plusieurs kilomètres ». Pour les lasers de TP, l'ordre de grandeur est plutôt 50 cm.

3/ Coin d'air

La discussion de la surface de localisation était bien menée. Là encore, avec des jolies franges, il est possible de montrer expérimentalement où se trouve cette surface en déplaçant la lentille de projection. Il faut à nouveau penser aux détails expérimentaux sur l'éclairage de l'interféromètre.

Le calcul de différence de marche utilisant l'épaisseur locale du coin d'air est nécessaire. Celui proposé par Arnaud fait implicitement l'hypothèse d'une incidence normale des rayons sur les miroirs (pas de $\cos\theta$, pris égal à 1), ce que j'ai oublié de pointer lors de la séance de correction. Ce n'est pas scandaleux puisque c'est l'éclairage habituel du Michelson en coin d'air, mais en revanche il faut le signaler.

On peut regretter l'absence d'application dans ce paragraphe. Une illustration expérimentale simple à mettre en œuvre et rapide à présenter est d'introduire un lamelle de microscope dans un des bras de l'interféromètre, et de visualiser ses défauts de surface : les franges se déforment jusqu'à donner des sortes de flaques, en raison des inhomogénéités d'épaisseur de la lame.

Enfin, bien que non indispensable, je pense que le passage en lumière blanche est un risque qui peut être tenté si vous êtes à l'aise avec la manipulation de l'interféromètre. Lors de mon oral ce passage a raté (j'ai du regarder ma feuille pour retrouver la position du contact optique), mais le jury m'a explicitement dit qu'ils savent que c'est difficile, et qu'ils ne m'en avaient pas du tout voulu.

III) Interféromètre de Fabry-Pérot

Un ancien rapport de jury (2001) invite à une illustration expérimentale du Fabry-Pérot. Je pense que maîtriser cet interféromètre peut être très payant, notamment en montage, mais c'est un vrai investissement en temps. Je ne le conseille donc qu'aux personnes maîtrisant déjà très bien l'optique expérimentale.

Cette partie a été un peu sacrifiée faute de temps. Il est donc nécessaire de se focaliser sur les idées centrales, et l'apport des interférences à N ondes par rapport aux interférences à deux ondes, ce qui a été correctement présenté.

Penser à mentionner dès l'introduction de cette partie que le Fabry-Pérot est un interféromètre à N ondes, N étant fixé par l'angle d'incidence et la taille des miroirs.

1/ Description du dispositif

Une lame à transmission contrôlée (faible pour un Fabry-Pérot, moitié pour la séparatrice d'un Michelson) est faite par dépôt métallique (typiquement de l'aluminium) d'épaisseur contrôlée sur une lame de verre. On se méfiera des coefficients en amplitude t et r , et en énergie T et R : on a bien $R = |r|^2$, mais comme $R + T = 1$, $T \neq |t|^2$.

La discussion du lieu de localisation par analogie avec la lame d'air est très satisfaisante. En revanche, les détails techniques sur l'éclairage de l'interféromètre ont encore fait défaut. Il existe dans la base de donnée une image d'un interféromètre, avec son système d'éclairage et de projection : je vous suggère de l'utiliser.

2/ Figure d'interférences

Ne pas mener les calculs au tableau est tout à fait admis, à condition de bien commenter les résultats. En revanche montrer les courbes I en fonction de $\Delta\varphi$ et les commenter est important. Pour montrer une courbe plus jolie qu'un dessin au tableau, et être sûr de les montrer dans fin de leçon au sprint, on peut aussi projeter cette courbe pour différentes valeurs de r (là encore image dans la banque de données).

3/ Applications

Cette partie prévue sur le poly n'a pas pu être présentée par manque de temps. C'est dommage, d'autant que l'application aux filtres interférentiels est intéressante à discuter. On pourrait aussi (= « au choix », pas « en plus ») parler des avantages d'un Fabry-Pérot en spectroscopie ou du rôle d'une cavité laser.

Conclusion

La conclusion doit reprendre explicitement et presque en les martelant les idées fortes de la leçon : ici l'intérêt de la division d'amplitude (plus de problème de cohérence spatiale) et sa contrepartie, la localisation. On n'hésitera pas à rappeler brièvement les exemples développés, et à en citer d'autres qu'on connaît pour attirer des questions.

Enfin une ouverture est souhaitable. Celle choisie par Arnaud de l'apport de l'expérience de Michelson et Morley à la révolution du début du XXe siècle me semble parfaitement appropriée. On pourrait aussi parler de VIRGO, qui est un interféromètre de Michelson géant, avec un Fabry-Pérot dans chaque bras pour augmenter leur longueur effective. Un sujet d'épreuve C datant d'une dizaine d'année traite le sujet en détails.

Questions

Les questions servent *d'abord* à éclaircir les points peu clairs de la leçon, puis *ensuite* à tester vos connaissances

plus largement. Voici des pistes de questions d'ouverture envisageables, qu'on n'a pas toutes posées pendant la correction.

L'interféromètre de Mach-Zehnder et l'interféromètre de Sagnac sont deux autres exemples d'interféromètres à division d'amplitude. Celui de Sagnac sert de gyroscope de précision, cf. Tillet pp. 57-58.

Le jury m'avait posé beaucoup de questions au sujet de la précision exigée sur l'épaisseur des lames et leur parallélisme. Les réponses se trouvent pour la plupart dans l'article de Gérard Fortunato, publié dans le BUP 795 (juin 1997). Pour mémoire, tous les BUP de plus de dix ans sont en libre accès sur internet.

La localisation peut donner lieu à des questions complexes. Être conscient notamment qu'elle est plus stricte en coin d'air (vraie à l'ordre 1 seulement) qu'en lame d'air (vraie à tous les ordres). Ces points sont discutés dans le H-Prépa, et peuvent facilement s'observer expérimentalement. De même, un Michelson éclairé avec une source ponctuelle ne donne pas lieu à localisation : les franges sont observables dans tout le champ d'interférences, et peu lumineuses.

La lumière blanche se prête aussi à des questions. Toute dissymétrie de couleur dans la figure d'interférences est due à un réglage imparfait du parallélisme entre séparatrice et compensatrice. La couleur de la frange centrale est un problème épineux : l'explication usuelle avec les déphasages aux réflexions vitreuses est à connaître (cf. Cap Prépa par exemple), mais il semblerait que ce soit en fait plus compliqué. On pourra regarder le site de Jean-Marc Vanhaecke à ce sujet.

Conclusion

Modulo les imperfections principalement dues à un manque d'entraînement expérimental et oral bien naturel en début d'année, la leçon présentée était de bonne qualité. Il est possible de développer davantage les applications en allant plus rapidement. C'est en tous cas une première leçon encourageante pour la suite de l'année.

Si vous avez d'autres questions, je reste à votre disposition par mail, en TP ou dans de futures séances de correction.

Sites web

- ▷ BupDoc : <http://www.udppc.asso.fr/bupdoc/>
- ▷ Jean-Marc Vanhaecke : http://lcs.malherbe.lyc14.ac-caen.fr/~vanhaecke/SITE_SPE/