

LP31 Interférences à deux ondes en optique.

Correcteurs : Paco Maurer¹ et Étienne Thibierge²

Leçon présentée le vendredi 3 octobre 2014

Le présent compte-rendu a pour but de résumer et compléter la discussion qui a suivi la présentation de la leçon en classe. Bien entendu, il est partiel et partial, et n'est qu'un point de vue qui n'engage que ses auteurs. Rappelons que c'est vous qui présenterez les leçons en fin d'année, et que c'est donc à vous de décider de ce que vous voulez en faire.

Extraits des rapports de jury

Je vous rappelle que le préambule du rapport de l'épreuve de leçon s'attache à présenter en détails les attentes et exigences du jury. Vous êtes plus qu'encouragés à le lire.

Jusqu'en 2013, la leçon s'intitulait « Obtention d'interférences à deux ondes en optique. Notion de cohérence. ». Ce changement de titre ne me semble pas très significatif, les points évoqués par l'ancien intitulé constituant toujours le cœur de la leçon telle qu'elle s'intitule aujourd'hui.

2014 : Un interféromètre comportant une lame séparatrice n'est pas obligatoirement utilisé en diviseur d'amplitude. La notion de cohérence et ses limites doivent être discutées.

2009 et 2010 : Il faut réfléchir à l'opération de moyenne réalisée par le détecteur et il est bon de connaître quelques ordres de grandeurs à ce sujet.

2005 : Dans cette leçon doivent apparaître les problèmes liés aux détecteurs (moyennes quadratiques) et aux sources (processus d'émission et nature des ondes émises), conduisant à la nécessité d'utiliser des montages interférométriques pour obtenir un terme de corrélation. Les phénomènes de localisation sont souvent mal formulés ou ignorés.

2003 : Cette leçon doit être illustrée expérimentalement, le candidat devant être en mesure de montrer clairement les effets de cohérence spatiale ou temporelle de la source.

Remarque personnelle : j'ai du mal à comprendre la première phrase du rapport 2014. Selon moi (et selon la plupart des livres), le fait d'utiliser une lame séparatrice *définit* la division d'amplitude ... Je crois qu'il vaut mieux comprendre cette remarque sous l'angle de la localisation : ce n'est pas parce qu'un interféromètre est à division d'amplitude que les interférences sont localisées.

Commentaires généraux

La leçon était une bonne leçon de début d'année. Les points les plus encourageants sont le souci de pédagogie, le plan dans l'ensemble bien construit, la présentation plutôt claire et l'illustration expérimentale très bien maîtrisée.

Néanmoins, beaucoup de petites erreurs ou de lapsus sont à éliminer du discours car ils seront pénalisants le jour de l'oral, et de façon générale la présentation peut être rendue plus percutante en gagnant en précision. Les familiarités doivent être bannies : on a beaucoup trop entendu parler de « la p'tite manip ». De même, le tableau mériterait d'être mieux utilisé en y écrivant en toutes lettres les définitions des mots clés de la leçon. Il faut également être vigilant à introduire toutes les notions nouvelles nécessaires à la compréhension de la leçon. Enfin, il est possible et conseillé de donner plus d'explications physiques qualitatives. Tous ces points sont importants, mais rassurez-vous, ils deviendront naturels dans le courant de l'année.

La place attribuée aux expériences dans la leçon constitue une vraie erreur pédagogique. Développer une théorie un peu désincarnée et l'illustrer pour terminer l'exposé n'est pas la façon dont la physique doit être enseignée aujourd'hui. Que ça vous plaise ou non, c'est comme ça, et le jury y est très sensible : des rapports récents vont jusqu'à qualifier une telle démarche de « non scientifique ». Il faut quasi-systématiquement aborder les expériences avant la théorie par une question du type « on voit ça, comment l'expliquer ? ». Une autre démarche productive est de présenter les grands traits d'une expérience, développer la théorie, et revenir à l'expérience pour présenter des subtilités que la théorie a permis de révéler.

Les transparents ne doivent pas être utilisés pour recopier des gros calculs, et encore moins si le seul commentaire que vous faites sur ledit calcul est « bon ben voilà le calcul ». Il est nécessaire de détailler un calcul long au tableau, et possible d'en faire un peu plus si le sujet s'y prête. En revanche, faire des calculs n'est pas l'objectif d'une leçon. Par conséquent, si un calcul est long et que ne le présentez pas au tableau, vous pouvez vous contenter de présenter la méthode et de sauter les étapes techniques pour aller droit au résultat. Le faire sur transparent vous prendra du temps et n'apportera rien à la leçon.

Retour sur la leçon présentée

Introduction

L'introduction doit être soignée pour mieux motiver la leçon. Une illustration expérimentale simple est la bienve-

1. paco.maurer@ens-lyon.fr

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

nue : par exemple, comparer la figure observée sur l'écran avec une simple fente et avec deux fentes permet de montrer que pour la lumière $2 \neq 1 + 1$.

1. Superposition de deux ondes

1.1. Moyennage par les détecteurs

Cette partie est importante et a été bien menée. Le nom donné à « l'éclairement instantané » me semble mal choisi : il serait plus prudent de parler de puissance instantanée ou de flux instantané pour ne pas risquer de confusion avec l'éclairement.

Donner des ordres de grandeur de temps de réponse typiques est attendu, mais attention à ne pas survendre les performances du matériel : le temps de réponse d'une photodiode de TP n'est pas 10^{-12} s, mais un 10^{-6} s plus modeste. L'expérience choisie pour mettre en évidence la réponse non instantanée de l'œil est très bien.

Remarque : éclairement et intensité sont des notions proches, mais pas identiques. L'intensité se réfère à l'énergie rayonnée par la source dans une direction donnée alors que l'éclairement correspond à l'énergie reçue par unité de surface d'un récepteur. L'amalgame est en général permis car les deux grandeurs sont proportionnelles la plupart du temps, quand la source n'est pas trop grande et suffisamment loin du récepteur. Ceci dit, il est plus correct de parler d'éclairement.

1.2. Modèle scalaire et superposition

Cette partie est intéressante mais demande d'être mieux présentée et rendue plus concrète. Il faudrait au moins s'appuyer sur un schéma représentant les sources, qui pourrait être complété au fur et à mesure de la discussion. De nombreuses imprécisions se sont glissées dans la présentation, auxquelles il faut être vraiment vigilant.

Le champ scalaire $s(M, t)$ doit être correctement défini à partir du champ électrique $\vec{E}(M, t)$: dire que c'est son amplitude est faux, ne serait-ce que parce qu'une amplitude est par convention positive. Il s'agit en fait de la projection du champ électrique sur une direction de polarisation. On pense naturellement à une polarisation rectiligne, mais cela n'a rien d'indispensable, il peut tout aussi bien s'agir d'une polarisation circulaire. Si la lumière est non-polarisée, toutes les polarisations sont équivalentes et tout va bien. Au contraire, si la lumière est polarisée, l'utilisation du modèle scalaire demande des précautions.

Le mot « interférences » doit être défini : il y a interférences entre deux ondes si la distribution d'éclairement issue de la superposition des deux ondes n'est pas la superposition des distributions d'éclairement issues de chacune des ondes. Le mot « cohérence » est au cœur de la leçon, lui aussi doit absolument être prononcé et défini comme étant la condition sous laquelle deux ondes donnent lieu à des interférences.

La notion de source secondaire doit être mieux précisée, notamment sur la façon dont les sources secondaires sont fabriquées à partir de la source primaire. Là encore, du concret est le bienvenu, et ça peut être l'occasion d'introduire la différence entre interféromètre à division de

front d'onde et division d'amplitude. Il serait intéressant de montrer les hyperboloïdes de révolution des surfaces équi-éclairement, ce qui permettrait de justifier l'allure des figures d'interférences couramment observées.

Le modèle des trains d'ondes a été introduit dans cette partie, ce qui nous semble prématuré : à ce stade, on en est toujours à comprendre ce que sont des interférences !

2. Expérience des trous d'Young

Il faut partir des observations expérimentales pour aller vers la théorie, et pas le contraire !

Les dispositifs d'Young ont l'inconvénient de reposer sur de la diffraction. Cependant, ce sont les exemples les plus classiques ... Attendez-vous toutefois à des questions à ce sujet. Tous les interféromètres à division de front d'onde peuvent donner lieu à des discussions et des illustrations comparables : ainsi, il serait équivalent d'utiliser par exemple les miroirs de Fresnel. Je pense que le choix est indifférent, à condition d'être conscient du rôle joué par la diffraction dans les dispositifs d'Young.

2.1. Présentation

Le lien avec la partie précédente doit être fait plus explicitement : où est la source primaire ? Où sont les sources secondaires ?

La notion de chemin optique était supposée parfaitement connue, je pense que c'est un peu ambitieux : il faut au moins rappeler sa définition et le rôle joué par l'indice optique.

Le calcul de différence de marche peut être mené plus simplement : il suffit de calculer la différence de marche entre la bifente et l'écran pour une source ponctuelle sur l'axe optique, et d'évoquer les symétries pour justifier le terme à ajouter si la source n'est pas sur l'axe. Penser aussi à introduire le champ d'interférences, et surtout à utiliser ce mot dans vos explications.

Dans le montage expérimental utilisé, l'objectif de microscope et la fente source ne servent à rien. Je comprends la motivation (rendre la situation symétrique par rapport à la lumière blanche, et ne pas trop voir les pics secondaires de diffraction), mais je ne suis pas sûr que ce soit une bonne idée, je crois qu'il faut privilégier la simplicité. Ceci dit, c'est un avis personnel, et je n'ai pas d'argument massue à proposer.

2.2. Cohérence spatiale

Le calcul sur transparent était peu lisible et pas du tout commenté. Dans ce cas, mieux vaut présenter la méthode et aller droit au résultat. Il est important de faire parler le résultat sous la forme d'un produit entre un facteur de contraste et un terme qui décrirait les interférences issues d'un point situé au milieu de la source.

Il faut insister sur les différences par rapport à la cohérence temporelle. En premier lieu, ce contraste est global, c'est-à-dire qu'il est le même en tout point du champ d'interférence et ne dépend pas de la différence de chemin optique. Autre chose essentielle, il implique à la fois l'interféromètre et la source. Ainsi, un théoricien peut toujours

rendre spatialement cohérente une source qui ne l'est pas : il suffit d'éloigner la source et l'interféromètre. Un expérimentateur risque d'avoir plus de mal, car beaucoup de lumière est perdue en procédant ainsi.

Pour quantifier la cohérence spatiale d'une source, il est d'usage dans les livres niveau prépa d'introduire une longueur de cohérence spatiale. Je ne suis pas sûr que ce soit une bonne idée : la grandeur pertinente est plutôt un angle, l'angle sous lequel l'interféromètre voit la source³. La longueur de cohérence spatiale n'est qu'une projection de cet angle⁴.

Une illustration qualitative sur transparent serait la bienvenue : représenter les figures d'interférences dues à différents points de la source, qui sont donc décalées, et les superposer pour montrer qu'on a éventuellement apparition d'un brouillage.

Je pense qu'à ce stade il serait bon d'expliquer ren une phrase pourquoi il est intéressant d'utiliser une source étendue (plus de lumière), et comment on peut s'affranchir des problèmes de cohérence spatiale (division d'amplitude).

2.3. Cohérence temporelle

Inutile de compliquer les choses en prenant un cas trop général : prendre la source sur l'axe est bien suffisant. Une nouvelle fois, il est important de présenter le résultat sous la forme d'un produit entre un facteur de contraste et un terme qui décrirait les interférences à la longueur d'onde centrale du spectre de la source.

Il faut mettre l'accent sur ce qui diffère par rapport à la cohérence spatiale : le contraste est désormais local car il dépend de la différence de chemin optique entre les deux voies. De plus, il est intrinsèque à la source, c'est-à-dire qu'il ne dépend pas du tout de l'interféromètre. Cette fois, la grandeur caractéristique est bien une longueur, la longueur de cohérence temporelle. Il faut faire parler la définition : la longueur de cohérence temporelle est la différence de chemin optique à partir de laquelle les effets de non-monochromaticité de la source se font sentir.

A ce stade, il est absolument indispensable de revenir sur le modèle des trains d'ondes (ou de le présenter s'il n'a pas encore été introduit). Le lien entre ce modèle et la largeur spectrale de la source doit être discuté. Pour compléter un peu la leçon, il est possible (mais pas du tout indispensable) de discuter l'origine de l'élargissement des raies spectrales et les profils de raie les plus courants : gaussien (élargissement Doppler thermique), lorentzien (élargissement collisionnel) ou de Voigt (convolution des deux). Si vous faites ce choix, attention toutefois à ne pas y passer trop de temps.

Une illustration qualitative sur transparent serait la bienvenue : représenter les figures d'interférences dues à différentes longueurs d'onde, qui sont donc plus ou moins dilatées, et les superposer pour montrer qu'on a éventuellement apparition d'un brouillage.

3. Interféromètre stellaire de Fizeau

C'est bien d'avoir le temps de présenter un exemple de ce type en fin de leçon. Il faut alors prendre le temps de bien le présenter, en écrivant suffisamment au tableau, et s'attacher à faire le lien avec le reste de la leçon : pourquoi peut-on avoir une différence de chemin optique de plusieurs dizaines de centimètres alors que les fentes d'Young sont séparées de moins d'un millimètre ? Est-on gêné par le spectre de l'étoile autant qu'en lumière blanche ?

Conclusion

La conclusion a été abordée trop tôt et a donné lieu à pas mal de broderie. En principe, la conclusion doit résumer la leçon en montrant comment elle a permis d'avancer dans la compréhension de la physique, et ouvrir sur les leçons suivantes. Deux ouvertures sont naturelles ici : la division d'amplitude et la diffraction effleurée via l'expérience d'Young.

Questions

Les questions servent *d'abord* à éclaircir les points peu clairs de la leçon, puis *ensuite* à tester vos connaissances plus largement. Voilà quelques notions sur des points qui pourraient être discutés lors des questions

Un piège classique au sujet des interférences est l'analogie entre les ondes lumineuses et les ondes mécaniques (au sens large). Dans le cas des ondes mécaniques, la problématique de la cohérence ne se pose pas, d'une part car les détecteurs peuvent suivre directement les variations temporelles et d'autre part car les expériences ont lieu sur des temps courts. Pour une analogie plus précise, il faudrait considérer par exemple une photographie de vagues avec un temps de pose très long (voir le livre d'optique de Tillet pour la discussion). Dans le même genre, pour des interférences entre deux diapasons, il faudrait faire une moyenne en réalisation la même expérience un million de fois : le déphasage entre les diapasons étant aléatoire, la répartition d'énergie acoustique serait uniforme.

Si vous utilisez le théorème de Malus pour étudier des interférences à l'infini, attention à ne pas oublier le principe de retour inverse de la lumière.

Les théorèmes de cohérence (Wiener-Kinchine et van Cittert-Zernike) n'ont pas à être abordés dans la leçon, ce serait beaucoup trop long et compliqué. Cependant, il est possible que des questions portent dessus, et je crois qu'il faut au moins que vous en ayez une idée qualitative.

Conclusion

La leçon présentée constitue une bonne base pour la construction de votre propre leçon, modulo les réserves mentionnées précédemment. Si vous avez d'autres questions, nous restons à votre disposition par mail, en TP ou dans de futures séances de correction.

3. En fait, il s'agit même d'un angle solide, mais on ne s'en rend pas compte dans le cas bidimensionnel qu'on considère habituellement

4. Dans la continuité de la note précédente, il serait plus judicieux de parler d'aire de cohérence spatiale