

Les étudiants et les interférences lumineuses: cohérence des sources et principe de superposition

Students and light interference: coherence of their sources and principle of superposition

Los estudiantes y las interferencias luminosas: coherencia de las fuentes y principio de superposición

Studenten und Lichtinterferenzen: Quellenkohärenz und Superpositionsprinzip

Intissar ROMDHANE

université Paris Diderot-Paris 7, Laboratoire de Didactique des Sciences Physiques.

Laurence MAURINES

université Paris-Sud 11, Groupe de didactique des sciences d'Orsay.

Résumé

Cet article présente les résultats d'une enquête exploratoire réalisée à l'aide de questionnaires écrits auprès de 321 étudiants (20-23 ans) ayant reçu un enseignement sur les interférences lumineuses. Elle porte sur les conditions d'obtention des interférences lumineuses liées à la cohérence temporelle et sur l'utilisation du principe de superposition des ondes dans différents contextes de cohérence. Nous retrouvons des tendances

de raisonnement déjà connues: utiliser des concepts voisins de ceux de l'optique géométrique, réduire le nombre de concepts à prendre en compte, privilégier des indices perceptibles. Quelques remarques sur les manuels scolaires et quelques propositions pédagogiques sont faites.

Mots-clés: conceptions, université, interférences lumineuses, cohérence, principe de superposition des ondes

Abstract

This study is part of a research program exploring the difficulties encountered by 321 students (aged 20-23) when learning light interference at university. It concerns the conditions of obtaining the luminous interferences related to temporal coherence and the use of the principle of superposition of waves in various contexts of coherence. We find tendencies of reasoning already put forward : to use concepts close to those of geometrical optics, to reduce the number of concepts to be taken into account, to privilege perceptible indices. Some text-books have been analysed and some pedagogical implications are discussed.

Key words: conceptions, university, light interference, coherence, principle of superposition of waves

Resumen

Este artículo presenta los resultados de una encuesta exploratoria realizada con ayuda de cuestionarios hechos por escrito ante 321 estudiantes (20 a 23 años) que han recibido una enseñanza sobre las interferencias luminosas. La encuesta trata de las condiciones de obtención de las interferencias luminosas vinculadas con la coherencia temporal y del uso del principio de superposición de las ondas en diferentes contextos de coherencia. Nos encontramos con tendencias de razonamiento ya conocidas: utilizar conceptos próximos a los de la óptica geométrica, reducir el número de conceptos tomados en cuenta, privilegiar los indicios perceptibles. Se hacen también, de paso, algunas observaciones sobre los libros de texto y algunas proposiciones pedagógicas.

Palabras clave: concepciones, universalidad, interferencias luminosas, coherencia, principio de superposición de las ondas.

Zusammenfassung

Dieser Artikel legt die Ergebnisse einer Untersuchung vor, die an Hand von schriftlichen Fragebögen bei 321 20 bis 23jährigen Studenten durchgeführt wurde. Alle Studenten haben ein Seminar über Lichtinterferenzen besucht.

Dieser Artikel betrifft die Erwerbungsbedingungen der Lichtinterferenzen in Zusammenhang mit der zeitlichen Kohärenz und der Benutzung des Superpositionsprinzips der Wellen in verschiedenen Kohärenzkontexten. Wir finden schon bekannte Gedankengänge wieder Begriffe benutzen, die nah an denen der geometrischen Optik sind, die Anzahl der zu berücksichtigenden Begriffe reduzieren, wahrnehmbare Indizien begünstigen. Schließlich werden einige Bemerkungen über Schulbücher gemacht und einige pädagogischen Vorschläge angeboten.

Schlüsselwörter: *Begriffe, Universität, Lichtinterferenzen, Kohärenz, Superpositionsprinzip der Wellen.*

INTRODUCTION

Le travail que nous présentons ici fait partie d'une recherche portant sur les interférences lumineuses. Nous avons choisi ce thème de la physique car il a donné lieu à peu de travaux en didactique. En effet, la plupart des recherches portant sur la lumière mettent en jeu des situations pouvant être étudiées par l'optique géométrique comme la vision, la formation des ombres et des images données par un miroir ou une lentille convergente, la réflexion et la réfraction partielle à une interface (Goldberg & Mc Dermott, 1987; Kaminski, 1989; Singh & Butler, 1990). Quelques recherches seulement concernent des situations demandant l'utilisation de l'optique ondulatoire telles que la diffraction par une ouverture, les interférences données par les fentes d'Young, la formation des images en éclairage cohérent en présence de diffraction ou d'interférences, la cohérence spatiale (Ambrose *et al.*, 1999; Colin & Viennot, 2000; Maurines, 1997, 1999, 2000; Wosilait *et al.*, 1999). Par ailleurs, la plupart des recherches portant sur d'autres types d'onde (ondes transversales sur une corde, ondes sonores) s'intéressent à des situations de propagation (Linder & Erickson, 1989; Maurines & Saltiel, 1988; Maurines, 1998). Seuls quelques travaux traitent de la superposition des ondes: signaux se propageant sur une corde (Wittmann *et al.*, 1999); ondes sphériques cohérentes (Maurines, 2003).

Souscrivant à une vision constructiviste de l'apprentissage qui impose de tenir compte de l'apprenant, nous avons décidé face à ce constat de dégager et d'analyser les difficultés rencontrées par les étudiants lors de l'étude des interférences lumineuses dans l'enseignement supérieur. Nous nous sommes intéressées aux principales difficultés qu'un enseignant peut observer dans sa classe et non à celles d'un étudiant en particulier. Nous nous sommes attachées à montrer que les erreurs commises dans une situation donnée sont la manifestation de tendances typées de raisonnement qui se manifestent transversalement à ces

situations. Nous avons cherché à établir un modèle de raisonnement, c'est-à-dire une description cohérente organisée autour d'un petit nombre de caractéristiques des principales tendances de raisonnement observées. Nous faisons l'hypothèse qu'un étudiant ne se conformera pas nécessairement à tout le modèle mais qu'à un moment ou à un autre, il mettra en œuvre une tendance de raisonnement que ce modèle décrit. Nous n'avons pas cherché à dégager des «raisonnements spontanés» existant avant enseignement, mais à repérer, à travers les raisonnements des étudiants résultant des enseignements habituels, les difficultés et les obstacles possibles à l'acquisition des concepts relevant des interférences lumineuses. Ainsi, comme bien souvent dans ce genre d'études, il s'agit en premier lieu, de repérer des erreurs et en deuxième lieu, de chercher à comprendre ce qui, dans ces erreurs, peut être dû à l'enseignement et ce qui peut être attribué à des manières de pensée préexistant à l'enseignement. Nous avons supposé que les tendances de raisonnement que nous mettrons à jour rejoindront par certains aspects celles mises en évidence par Maurines (1997, 2000) dans le domaine des ondes, en particulier dans le cas de la diffraction de la lumière.

Après avoir précisé comment nous avons déterminé des thèmes et questions de recherche et fait des hypothèses sur les difficultés susceptibles d'être rencontrées par les étudiants, nous détaillerons les questions que nous avons choisi de traiter dans cet article et la méthodologie que nous avons suivie pour y répondre. Nous donnerons ensuite les résultats obtenus et le modèle que nous avons construit pour les interpréter. Nous terminerons par quelques remarques sur les manuels d'enseignement et quelques propositions pédagogiques.

1 QUESTIONS EXPLORÉES

Nous avons débuté notre recherche en nous intéressant au concept de déphasage car c'est un concept fondamental pour l'étude des situations nécessitant l'utilisation de l'optique ondulatoire (interférences et diffraction). Nous avons réalisé une mini-enquête pour le mémoire de DEA auprès d'étudiants tunisiens ayant reçu un enseignement (Romdhane, 2001). Il s'agissait essentiellement de voir si, pour eux, le déphasage entre deux ondes lumineuses en un point donné de l'espace dépend de la vitesse de propagation de l'onde, de la position de deux sources qui interfèrent, de la position de la source primaire dans le dispositif des fentes d'Young. Si les réponses obtenues à la question portant sur le lien entre le déphasage et la vitesse de propagation ont pu être exploitées (on y retrouve la difficulté à identifier l'invariant fondamental qu'est la fréquence de l'onde et la tendance à privilégier les concepts d'intensité et d'amplitude au détriment de celui de phase mises en évidence par Maurines, 1997,

1999, 2003), les réponses obtenues aux autres questions n'ont pu l'être car elles n'étaient pas assez nombreuses et explicites.

Les résultats de cette mini-enquête nous ont conduites à affiner notre analyse du domaine conceptuel et des difficultés susceptibles d'être rencontrées par les étudiants. Nous avons alors décidé de poursuivre notre recherche en prenant comme thématique centrale non pas celle du déphasage mais celle des interférences lumineuses.

Pour que notre travail puisse contribuer à améliorer l'enseignement des interférences aussi bien en Tunisie qu'en France, nous avons été amenées à nous intéresser aux programmes d'enseignement de ces deux pays. Les interférences lumineuses sont étudiées à différents niveaux d'enseignement selon différents niveaux de formulation. En France, les interférences et la diffraction de la lumière ne sont plus introduites en classe de terminale scientifique depuis la rentrée 2002. En classes préparatoires scientifiques, elles sont enseignées en deuxième année. À l'université, elles sont étudiées en troisième année, le plus souvent après avoir été abordées une première fois en deuxième année. En Tunisie, les interférences et la diffraction de la lumière sont encore introduites pour la première fois en classe de terminale scientifique. Elles sont enseignées en deuxième année en classes préparatoires et en quatrième année à l'université. En France comme en Tunisie, l'optique géométrique est abordée en première année en classes préparatoires et en général aussi d'université. Nous avons choisi de nous situer à un niveau d'enseignement équivalent à celui dispensé en deuxième année de classes préparatoires. Avant de poursuivre, disons quelques mots sur ces programmes, ce qui justifiera en partie le choix de nos thèmes et questions de recherche.

Les programmes des classes préparatoires en Tunisie et en France suivent le même ordre thématique. Il en est de même des programmes des universités où se trouvaient les étudiants que nous avons interrogés. Ils abordent d'abord les interférences lumineuses puis la diffraction. Plus précisément, le cours débute avec les interférences par division du front d'onde produites par des dispositifs tels que les fentes d'Young et les miroirs de Fresnel éclairés par une lumière totalement cohérente (lumière monochromatique émise par une source ponctuelle). Il se poursuit avec les interférences par division d'amplitude et des dispositifs tels que les lames à faces parallèles, les coins d'air, le Michelson. Les réseaux sont étudiés après le chapitre sur la diffraction. À l'université, les interféromètres à ondes multiples tels que le Fabry Pérot sont étudiés à partir de la troisième année. Dans le début de tous les programmes du supérieur consultés, une grande place est accordée aux conditions d'obtention des interférences liées à la largeur du spectre de la lumière émise par la source et à leur interprétation qualitative grâce au modèle du train d'onde, autrement dit à la cohérence temporelle de la lumière. Il est à noter que c'était également le cas dans

le programme de la classe de terminale scientifique en France avant la rentrée 2002. Les conditions d'obtention des interférences lumineuses liées à l'étendue de la source de lumière, c'est-à-dire à la cohérence spatiale de la lumière, font également partie des programmes du supérieur. Toujours abordées après les conditions d'obtention liées à la cohérence temporelle, elles apparaissent associées à un dispositif particulier dans la partie cours des programmes de classes préparatoires, le Michelson. L'interprétation quantitative des conditions d'obtention des interférences, c'est-à-dire le lien entre le contraste de la figure d'interférences et la nature de l'éclairage et la largeur de la source est abordée à l'université. C'est explicitement demandé en classes préparatoires dans les cas particuliers d'un doublet spectral émis par une source ponctuelle (sauf dans la filière mathématique-physique) et de deux sources ponctuelles monochromatiques (uniquement dans la filière physique et technologie).

Parallèlement à cette étude des programmes, nous en avons réalisé quatre autres afin de préciser les thèmes et questions de recherche : une analyse de la physique des interférences lumineuses et de son histoire, un examen des manuels d'enseignement, une analyse des résultats des recherches sur les conceptions dans le domaine des ondes. L'analyse de la physique des interférences lumineuses nous a permis de construire un cadre de référence en physique. Nous avons cherché à donner une vision cohérente et unifiée du domaine, organisée autour d'un petit nombre de connaissances. Nous n'en donnerons ici qu'un aperçu lorsque nous présenterons les réponses correctes aux questions que nous avons posées aux étudiants. Ce cadre nous a permis de définir quelques points délicats à explorer et nous a servi de référence à laquelle comparer les manuels d'enseignement, les résultats des recherches sur les conceptions dans le domaine des ondes, l'histoire de la physique des interférences lumineuses. Nous avons ainsi pu émettre d'autres hypothèses sur les difficultés susceptibles d'être rencontrées par les étudiants. Par la suite, l'ensemble de ces quatre études nous a permis d'analyser les réponses des étudiants.

Le domaine des interférences lumineuses ayant été peu exploré sur le plan de la didactique, nous avons choisi de nous centrer sur les situations d'interférences introduites en début d'enseignement : les situations d'interférences à deux ondes. Nous avons également décidé de consacrer une grande part de notre travail à une question fondamentale sur laquelle les programmes d'enseignement mettent l'accent et sur laquelle les scientifiques ont buté autrefois, celles des conditions de l'obtention des interférences lumineuses et de leur interprétation, autrement dit à la question de la cohérence de la lumière. Comme il existait deux études sur les interférences produites par le dispositif des fentes d'Young éclairé en lumière monochromatique (Ambrose *et al.*, 1999 ; Wosilait *et al.*, 1999), nous avons élargi le domaine d'investigation à d'autres dispositifs interférentiels

à deux ondes (miroirs de Fresnel, lames à faces parallèles ou non), et à d'autres types d'éclairage (ondes quasi-monochromatiques ou dont le spectre comporte deux radiations, sources étendues ou constituées de deux sources ponctuelles). Comme les recherches en didactique montrent l'existence de difficultés liées à la formation d'image par une lentille en présence d'interférences et de diffraction (Colin & Viennot, 2000 ; Maurines, 2000), nous avons choisi des situations expérimentales dans lesquelles les interférences sont observées par l'œil, soit directement, soit uniquement à l'aide d'un écran.

Notre recherche sur les interférences lumineuses est constituée de deux séries d'enquêtes. Elles constituent deux niveaux d'étude du phénomène. Lors de la première série d'enquêtes, nous avons cherché à savoir de quels facteurs dépend l'existence d'interférences lumineuses pour les étudiants : nature de la lumière émise, largeur et position de la source de lumière, dispositif interférentiel. Nous avons également examiné comment les étudiants expliquent, notamment à l'aide de schémas, le phénomène d'interférences obtenues avec différents dispositifs et dans différents contextes de cohérence. Les résultats obtenus lors de cette première série d'enquêtes nous ont conduites à réaliser une deuxième série d'enquêtes. Nous avons examiné si les étudiants connaissent le modèle du train d'onde et les différents critères permettant de caractériser la cohérence de la lumière. Nous avons approfondi la question de l'utilisation du principe de superposition des ondes dans des situations d'éclairage partiellement cohérent. Par ailleurs, comme des raisonnements mécanistes avaient été mis en évidence dans le domaine des ondes, nous nous sommes intéressées aux grandeurs caractérisant la propagation d'une onde (vitesse, fréquence, longueur d'onde) dans une situation d'interférences. Le tableau 1 précise les thèmes abordés dans chacune des séries d'enquêtes.

Notre recherche a donné lieu à deux bilans partiels (Romdhane & Maurines, 2003, 2005) et à une synthèse (Romdhane, 2007). Nous ne présentons ici qu'une partie du travail réalisé lors de la première série d'enquêtes. Nous nous intéressons à deux thèmes : les conditions d'obtention des interférences lumineuses liées à la cohérence temporelle, l'utilisation du principe de superposition des ondes dans différents contextes de cohérence.

Première série d'enquêtes	Deuxième série d'enquêtes
Conditions d'obtention des interférences lumineuses	Figures d'interférences en éclairage partiellement cohérent
Figures d'interférences en éclairage totalement cohérent	Caractérisation de la cohérence spatio-temporelle de la lumière
Dispositifs interférentiels (trous d'Young, miroirs de Fresnel, lames à faces parallèles et en coin)	Grandeurs caractérisant la propagation d'une onde dans une situation d'interférences
Principe de superposition des ondes dans différents contextes de cohérence	

Tableau 1 • Thèmes explorés dans la recherche sur les interférences lumineuses

Dans cet article, nous apporterons des éléments de réponse aux questions suivantes :

- les étudiants connaissent-ils les conditions d'obtention des interférences lumineuses? Savent-ils que deux sources de fréquences différentes ne peuvent pas donner des interférences, qu'il en est de même pour deux sources identiques mais indépendantes, que deux lasers identiques peuvent par contre produire des interférences? Comment expliquent-ils ces différences? Leurs arguments font-ils appel à un modèle particulier de l'émission lumineuse, celui de l'émission aléatoire de train d'ondes, ou bien à autre chose?
- les étudiants savent-ils que l'existence des interférences ne dépend pas du déphasage relatif des sources, du moment que celui-ci est constant au cours du temps? La tendance à se centrer sur un aspect de la situation rencontrée dans de nombreux domaines de la physique (Viennot, 1996), en particulier dans le domaine des ondes (Maurines, 1999, 2000, 2003), ne les conduira-t-elle pas à se focaliser sur les sources et à ne pas prendre en compte le déphasage introduit par la propagation et à nier l'existence d'interférences dans le cas de sources en opposition de phase?
- les étudiants savent-ils qu'il est nécessaire d'avoir deux sources secondaires pour avoir des interférences? Pensent-ils qu'une seule source suffit, comme les étudiants de première année d'université interrogés par Ambrose *et al.* (1999) aux États-Unis à propos du dispositif des fentes d'Young dans lequel une fente est rendue opaque? Si oui, quelles explications fournissent-ils? Conçoivent-ils aussi la figure d'interférences comme la superposition de deux figures créées par chacune des sources secondaires? Utilisent-ils une règle d'addition des intensités lumineuses comme en optique

géométrique classique ou bien le principe de superposition des ondes de l'optique ondulatoire ?

- comment les étudiants expliquent-ils l'existence d'une figure d'interférences, en particulier dans le cas de trois sources secondaires et non de deux ? Font-ils appel au concept de phase et au principe de superposition des ondes spécifiques à l'optique ondulatoire ? Retrouve-t-on les tendances à utiliser des concepts et principes voisins de ceux de l'optique géométrique, notamment une règle d'addition des intensités, mises en évidence par Ambrose *et al.* (1999), Colin et Viennot (2000) et Maurines (1997, 1999, 2000) ?
- comment les étudiants raisonnent-ils lorsque la lumière n'est pas cohérente spatialement (deux sources primaires ponctuelles) ou temporellement (une source primaire ponctuelle émettant deux radiations monochromatiques) ? Considèrent-ils que la figure d'interférences obtenue est la superposition de deux figures d'interférences produites par chaque source primaire ou chaque radiation ? Autrement dit, utilisent-ils d'abord le principe de superposition des ondes de l'optique ondulatoire puis la règle d'addition des intensités lumineuses de l'optique géométrique classique ?
- est-ce que les étudiants savent distinguer des sources secondaires cohérentes (deux trous d'Young élargis éclairés par une lumière cohérente) et incohérentes (deux trous d'Young devant lesquels sont placés des filtres différents) ? Savent-ils utiliser le principe de superposition des ondes dans ces différents contextes ?

2 MÉTHODOLOGIE

Nous avons choisi d'utiliser essentiellement des questionnaires pour mener à bien notre recherche car nous voulions avoir des résultats démonstratifs et facilement transmissibles. Pour réaliser les deux séries d'enquêtes, nous avons construit une quinzaine de questionnaires comportant en moyenne quatre questions. Celles de la première série d'enquêtes ont été définies par les études préalables et testées au cours de cinq entretiens. Elles ont ensuite été ajustées et précisées. Les questions de la deuxième série d'enquêtes n'ont pas été testées lors d'entretiens car l'analyse *a priori* avait été jugée suffisante.

Comme notre objectif n'était pas uniquement de faire un bilan des difficultés des étudiants et d'établir un ensemble disparate de questions-réponses, nous avons fabriqué des familles de questions possédant une

caractéristique commune, d'autres pouvant varier par ailleurs. L'apparition d'un même type de réponses dans un ensemble de telles familles est en effet tout autant significatif sinon plus qu'un taux élevé de réponses à une seule question. Elle montre en effet que les difficultés des étudiants sont liées à l'existence de raisonnements possédant une certaine cohérence interne qui leur donne un caractère général et prédictif. Un type de raisonnement n'existant pas en soi mais dépendant de la situation qui l'a suscité, nous devons tenir compte des deux. Nous cernons ainsi le raisonnement et son domaine d'utilisation. Nous avons suivi en cela la méthodologie détaillée par Closset et Viennot (1984).

Certains questionnaires portent sur un dispositif interférentiel précis (les trous d'Young, les miroirs de Fresnel, les lames à faces parallèles ou non), d'autres ne concernent que des sources secondaires, d'autres encore que des sources primaires. Les autres traitent du modèle du train d'onde et des grandeurs caractérisant la cohérence de la lumière. Toutes les questions sont qualitatives et demandent une justification de la réponse. La plupart portent sur l'existence d'interférences et l'aspect de la figure d'interférences, pour certaines il s'agit de décrire et d'expliquer ce qui se passe dans une situation donnée, pour d'autres de faire une comparaison avec une situation de référence identique à un facteur près. Beaucoup de questions demandaient aux étudiants d'accompagner leur réponse d'un schéma. La question se posait en effet de savoir sur quels types de rayons et de sources le raisonnement des étudiants se fonde : ceux de l'optique géométrique ou ceux de l'optique ondulatoire ?

Compte tenu du caractère exploratoire de cette étude, nous avons cherché avant tout à mettre en évidence des typologies de difficultés et à proposer les premiers éléments d'interprétation. Les réponses obtenues ont été analysées questionnaire par questionnaire et question par question. Pour chaque question, nous avons cherché à dégager un nombre minimum de catégories significatives en tenant compte à la fois des réponses brutes et des justifications données, et le cas échéant des schémas. Les résultats obtenus à l'ensemble des questionnaires ont ensuite été rapprochés. Nous avons alors pu constater que les éléments d'interprétation avancés pouvaient rendre compte des réponses obtenues à plusieurs questions et relevaient de quatre tendances de raisonnement. Nous avons ainsi adopté une méthodologie comparable à celle suivie par Minstrell (1992).

Les questionnaires ont été distribués à 758 étudiants français et tunisiens ayant reçu un enseignement équivalent à celui dispensé en deuxième année de classes préparatoires. Il est à noter qu'ils avaient tous reçu un premier enseignement sur les interférences lors de leurs études secondaires. Les étudiants n'ont pas eu à répondre à tous les questionnaires si bien que le nombre de réponses obtenues à une question varie. La nature et l'effectif des populations interrogées à chaque questionnaire n'ont pas

permis, à cette étape de la recherche, de faire une analyse comparative systématique des résultats en fonction de l'enseignement suivi. Nous avons dépouillé les réponses données à un questionnaire sous-groupe par sous-groupe puis comparé les résultats de chaque sous-groupe. Comme ceux-ci ne présentaient pas de différence significative, nous les avons regroupés et supposé que nous mettions à jour des tendances fortes de raisonnement de sens commun dans le cas de réponses similaires fournies à des questions pour lesquelles les programmes faisaient apparaître des différences d'approches (par exemple pour les lames minces). Les pourcentages associés à chaque catégorie significative ne peuvent être interprétés qu'en tant que tendances majoritaires ou minoritaires. Un pourcentage de 25 % de réponses erronées après enseignement peut être le signe d'une difficulté s'il était légitime d'attendre un pourcentage nul ; il en est de même d'un nombre faible de réponses correctes ou d'un nombre élevé de non-réponses.

3 RÉSULTATS

Les quatre questionnaires portant sur les thèmes abordés dans cet article ont été distribués à une population totale de 321 étudiants : étudiants français en licence de physique et en préparation au Capes de sciences physiques, étudiants tunisiens en deuxième année de classes préparatoires et en quatrième année de maîtrise de physique.

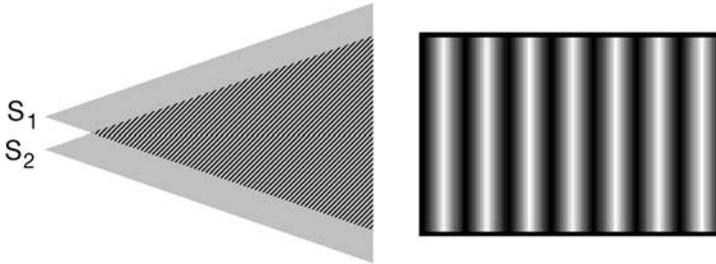
3.1 Les étudiants et les conditions de cohérence temporelle des sources

Nous avons examiné cette question en proposant à 47 étudiants un questionnaire présentant les trois situations décrites dans l'encadré 1.

<p>Pour chacune des situations suivantes, peut-on observer un phénomène d'interférences sur l'écran E ? Si oui, représentez la figure observée. Expliquez pourquoi on observe ce phénomène en vous aidant d'un schéma si besoin est. Si non, qu'observe-t-on sur l'écran et pourquoi ?</p> <p>Situation 1 : S1 et S2 sont deux lampes à vapeur de sodium considérées comme des sources ponctuelles.</p> <p>Situation 2 : S1 et S2 sont deux lampes considérées comme des sources ponctuelles monochromatiques émettant des lumières de longueur d'onde différentes.</p> <p>Situation 3 : S1 et S2 sont deux lasers He-Ne dont on a élargi le faisceau lumineux grâce à un dispositif optique non représenté. Les faisceaux sont divergents.</p>	
--	--

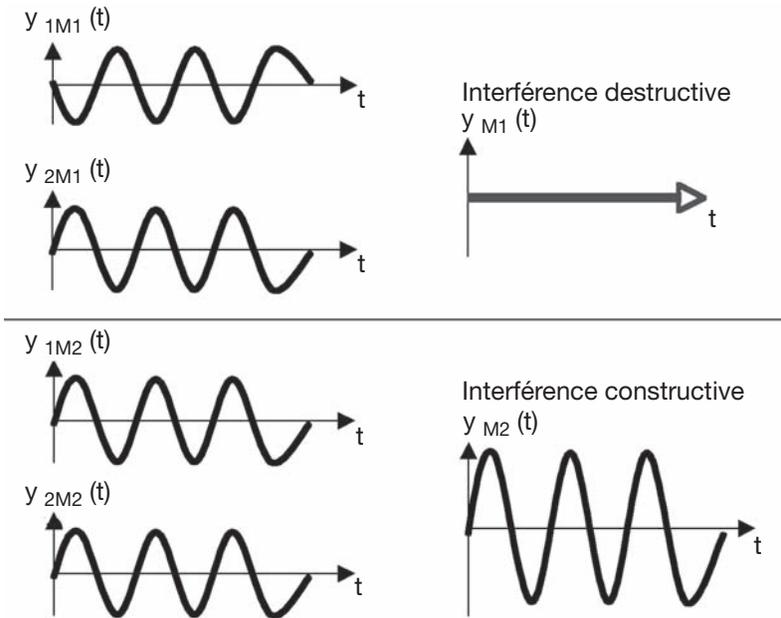
Encadré 1 • Les questions concernant les conditions de cohérence temporelle des sources

Commençons par préciser le contenu théorique visé par ces questions. On dit qu'il y a «interférences» lorsqu'il existe des franges alternativement sombres et brillantes dans la zone commune à plusieurs faisceaux lumineux (encadré 2).



Encadré 2 • Les interférences lumineuses: alternance de franges sombres et brillantes

Seul un modèle ondulatoire de la lumière fondé sur le principe de superposition des ondes peut expliquer ce phénomène. Celui-ci dit qu'en un point M de la zone commune, la fonction décrivant l'onde résultant de l'existence de deux ondes, émises simultanément par deux sources S_1 et S_2 , est égale à la somme des fonctions décrivant les deux ondes prises séparément. L'encadré 3 explicite le cas de la superposition de deux ondes sinusoïdales. Les graphes représentent les fonctions décrivant ce qui se passe en un point M de l'espace au cours du temps lors de la propagation de l'onde émise par S_1 seule ($y_{1M}(t)$), par S_2 seule ($y_{2M}(t)$), par les deux ($y_M(t)$). Le déphasage des deux ondes dépend de la différence de trajets entre le point d'observation M et les deux sources, donc du point M. Les ondes émises par les deux sources ayant la même amplitude mais étant en opposition de phase en M_1 , l'onde résultante en M_1 a une amplitude nulle (interférence destructive: frange sombre). En un point M_2 où les deux ondes composantes sont en phase, l'onde résultante sera décrite par une fonction sinusoïdale d'amplitude maximale (interférence constructive: frange brillante).



Encadré 3 • Principe de superposition des ondes $y_M(t) = y_{1M}(t) + y_{2M}(t)$

Pour obtenir l'intensité détectée par un récepteur (un œil par exemple), il faut prendre le carré de la fonction associée à l'onde, et en prendre la valeur moyenne temporelle pour tenir compte du temps de réponse du récepteur. L'intensité de l'onde résultante ainsi obtenue est égale à la somme des intensités des ondes prises séparément et d'un troisième terme appelé « fonction de corrélation ». Cette fonction n'est pas nulle lorsqu'il y a des interférences : les ondes ne vérifient pas dans ce cas la règle d'addition des intensités de l'optique géométrique classique. Dans le cas où cette fonction de corrélation est nulle, il n'y a pas d'interférences : les ondes vérifient la règle d'addition des intensités de l'optique géométrique classique.

Deux faisceaux issus de deux sources ponctuelles donnent des interférences si les sources sont cohérentes. Cela signifie qu'elles ont la même fréquence et que le déphasage entre les deux sources est constant au cours du temps. Il n'existe pas de source ponctuelle de lumière rigoureusement monochromatique, autrement dit, il n'existe pas d'onde lumineuse sinusoïdale de durée infinie. La lumière émise par les sources dites « quasi-monochromatiques » est constituée d'une succession de trains d'ondes de même fréquence émis aléatoirement. La durée d'un train d'onde est d'autant plus grande que le spectre en fréquence de la lumière est étroit. Deux sources quasi-monochromatiques, identiques et

indépendantes, peuvent donner lieu à des interférences si la durée des trains d'ondes est supérieure au temps de réponse du récepteur. Deux lampes à vapeur de sodium ne peuvent donner des interférences. Ce n'est que récemment, que des interférences ont pu être obtenues avec deux lasers (Hecht, 2002).

Les résultats obtenus aux questions présentées dans l'encadré 1 sont regroupés dans le tableau 2.

Situation (N = 47)	Interférence	Pas d'interférence	Pas de réponse
1. deux lampes identiques	57 %	36 % correct	7 %
2. deux sources monochromatiques non synchrones	23 %	68 % correct	9 %
3. deux lasers	68 % correct	26 %	6 %

Tableau 2 • Résultats bruts en pourcentage

À la première situation mettant en jeu deux lampes indépendantes identiques autres que des lasers, un nombre important d'étudiants donne une réponse fautive en disant qu'on peut observer des interférences (57 %, N = 47). Un grand nombre des 17 justifications fournies (57 %) mentionnent que les sources sont cohérentes. Un grand nombre également (69 %) montrent que les étudiants confondent les critères de cohérence temporelle et de cohérence spatiale. En effet, elles font référence au fait que les lampes à vapeur de sodium sont ponctuelles et non à l'émission aléatoire de trains d'onde ou à la largeur du spectre de la lumière émise. Un nombre inférieur d'étudiants répond correctement (36 %, N = 47). Les 16 justifications fournies mentionnent le fait que les sources sont incohérentes d'une part (56 % : « *les deux sources indépendantes sont incohérentes* ») et non monochromatiques d'autre part (19 %).

À la deuxième situation mettant en jeu deux sources monochromatiques non synchrones, un nombre non négligeable d'étudiants répond de manière incorrecte en disant qu'on peut observer des interférences (23 %, N = 47). Sur les 10 justifications fournies, les caractéristiques des deux sources ne sont pas comparées. Les étudiants se focalisent sur celles d'une source sans qu'il s'agisse d'une confusion entre battement et interférence (le mot battement n'apparaît pas) et tout semble se passer comme si une source unique pouvait donner des interférences : « *chaque longueur d'onde a son propre système de franges* ». Une majorité d'étudiants (68 %) répond correctement en disant qu'il n'y a pas d'interférences mais peu justifient leur réponse. Quatre précisent que les sources ne sont pas synchrones et huit qu'elles sont incohérentes.

À la troisième situation mettant en jeu deux lasers, la plupart des étudiants répondent correctement en disant qu'il existe des interférences (68 %, N = 47). Cependant, ces étudiants ne justifient pas toujours correctement leur réponse. En effet, sur les 19 justifications fournies, on en rencontre qui font référence à la ponctualité des sources (16 %) ou à leur synchronicité (21 %). Seules 21 % des justifications se réfèrent à la cohérence du laser: «*les lasers sont des sources cohérentes*». Il est à noter que beaucoup d'étudiants insistent sur le fait que les deux faisceaux se superposent (58 %, N = 47) : » *il existe une zone commune*».

3.2 Les étudiants et les sources en opposition de phase

Pour explorer cette question, nous avons élaboré un questionnaire demandant quelles sont les modifications de la figure d'interférences observée sur un écran lorsqu'une caractéristique de la situation de référence est modifiée. Le déphasage entre les sources secondaires est l'une d'entre elles. Lorsque les deux sources sont en opposition de phase, il existe toujours une figure d'interférences sur l'écran mais celle-ci est décalée par rapport à la figure donnée par deux sources en phase.

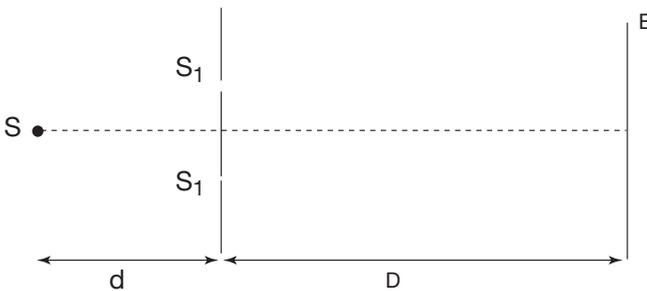
Notons tout d'abord qu'un nombre non négligeable d'étudiants ne répondent pas (24 %, N = 76) et que deux étudiants donnent une réponse incorrecte en disant que la figure d'interférences ne change pas. La majorité des étudiants (76 %, N = 76) répondent à juste titre que la figure d'interférences observée sur un écran et donnée par deux sources secondaires ponctuelles est modifiée lorsque les deux sources ne sont plus en phase mais en opposition de phase. Il y a cependant un nombre non négligeable d'étudiants (28 %, N = 76) qui disent qu'il n'y a «*pas d'interférence*». Les justifications fournies font appel au fait que «*les sources ne sont pas cohérentes*» (4 %) ou que «*les sources ne sont pas en phase*» (5 %). Tout se passe comme si pour les étudiants, la différence de phase entre deux ondes était constante durant la propagation ou comme si le terme «*cohérence*» signifiait «*en phase*».

Parmi les 48 % d'étudiants qui répondent qu'il y a des interférences lumineuses, seulement 25 % mentionnent un changement de la position des franges: «*la position des franges sombres qui va prendre la place des franges brillantes*» (13 %) ou «*les franges seront décalées*» (12 %). Les autres étudiants précisent des changements erronés concernant soit une autre caractéristique géométrique (forme des franges 14 %, écartement 11 %, direction 4 %), soit une caractéristique énergétique (luminosité 12 %, contraste 13 %). Un nombre plus petit d'étudiants fait référence à la couleur (5 %).

3.3 Les étudiants et le principe de superposition des ondes

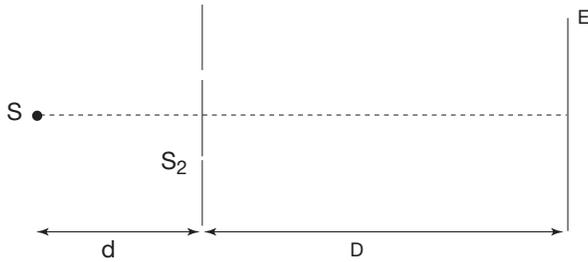
Les trains d'ondes émis par une source de lumière quasi-monochromatique ordinaire étant émis de manière aléatoire, il est nécessaire de créer deux sources secondaires présentant un déphasage constant au cours du temps à partir d'une source primaire pour obtenir des interférences. Il existe plusieurs dispositifs pour créer des sources secondaires. Celui appelé dispositif des trous d'Young, constitué par deux « petits » trous percés dans un écran opaque, est l'un d'eux. Pour examiner comment les étudiants utilisent le principe de superposition des ondes, nous avons choisi de leur présenter plusieurs situations se rapportant à ce dispositif car les sources secondaires sont bien « visibles » contrairement à ce qui se passe pour les miroirs de Fresnel et les lames minces. Elles diffèrent de celles de la situation de référence par le nombre et la taille des sources primaires et secondaires (situations 1 à 4 de l'encadré 4), par la nature de la lumière émise par la source primaire (encadré 6) ou les sources secondaires. Selon les situations, les étudiants doivent avoir recours au principe de superposition des ondes seul (cas d'une lumière totalement cohérente) ou bien d'abord à ce principe puis à une règle d'addition des intensités (cas d'une lumière partiellement incohérente) ou bien uniquement à une règle d'addition des intensités (cas d'une lumière totalement incohérente).

Situation de référence : On place une source lumineuse S , monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S_1 et S_2 , distants de « a ». Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est « d » et la distance trous-écran d'observation E est « D ».

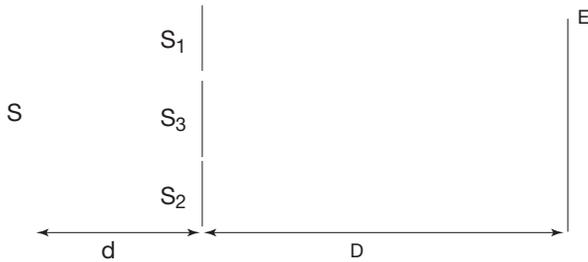


Pour chacune des situations suivantes, indiquez si la figure observée sur l'écran est identique ou non à celle de la situation de référence. Si elle est différente, précisez ce qui a changé (écartement des franges, position, luminosité, contraste, autre chose...) et justifiez votre réponse en vous aidant d'un schéma.

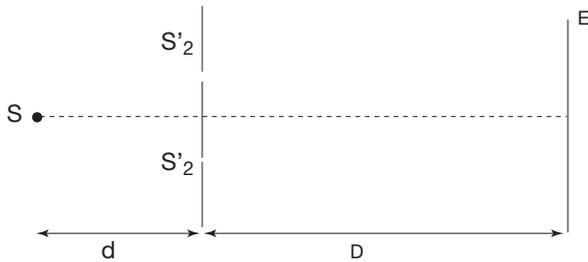
Situation 1 : On cache le trou S_1



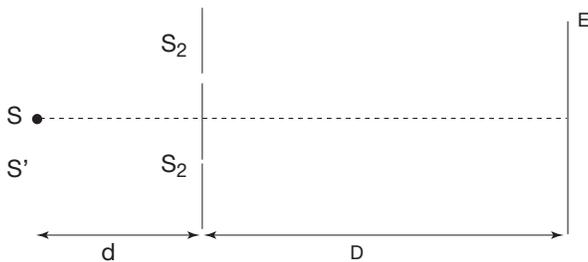
Situation 2 : On utilise la source monochromatique ponctuelle de la situation de référence et un écran percé de trois trous équidistants assimilés à des points, S_1 , S_2 , S_3



Situation 3 : On utilise la source ponctuelle monochromatique S et un écran percé de deux trous S'_1 et S'_2 . Ces trous sont petits mais on ne peut plus les considérer comme des points.



Situation 4 : On utilise deux sources ponctuelles monochromatiques S et S' identiques à celle de la situation de référence



Encadré 4 • Les étudiants et les trous d'Young en lumière quasi-monochromatique

Le principe de superposition des ondes en lumière quasi-monochromatique

La diffraction de la lumière ne pouvant pas être négligée au niveau de chacun des trous (encadré 4), les trous se comportent comme deux sources de lumière émettant dans toutes les directions. Dans la zone commune aux faisceaux lumineux issus des deux trous, des franges d'interférences peuvent être observées quand les trous sont cohérents. Cela se produit quand les trous sont éclairés par une source primaire « suffisamment petite ». L'aspect des franges observées sur l'écran dépend de la largeur des trous percés dans l'écran et de la dimension de la source primaire, pour une longueur d'onde donnée et des distances source-trous et trous-écran données.

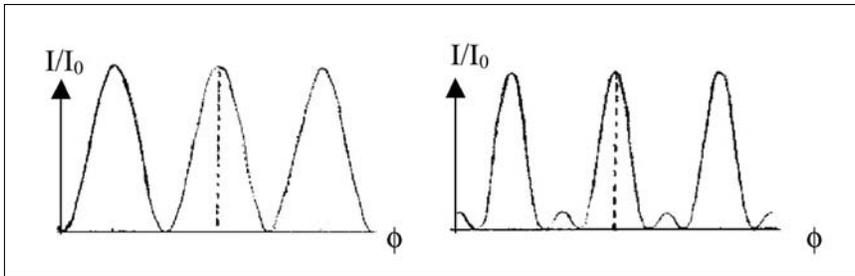
Quand la source primaire est ponctuelle (cohérence spatiale totale), les trous présentent un déphasage constant au cours du temps. Si ceux-ci sont assimilables à des points, la figure d'interférence sera identique à celle donnée par deux sources ponctuelles : les franges sont bien contrastées, rectilignes, équidistantes et perpendiculaires au plan de la figure de l'encadré 4. Si les trous ne peuvent plus être considérés comme ponctuels (situation 3 de l'encadré 4), la figure observée sur l'écran sera identique à celle donnée par la superposition des ondes émises par deux sources étendues : les franges rectilignes d'interférences sont modulées par les anneaux dus à la diffraction de la lumière par un trou. La largeur du champ d'interférences observé sur l'écran sera d'autant plus grande que le diamètre des trous est petit.

Quand un des trous est caché (situation 1 de l'encadré 4), la figure observée sur l'écran n'est plus une figure d'interférences due à la superposition des ondes émises par les deux trous mais une figure de diffraction due à la superposition des ondes émises par les points de la surface d'un trou. Les franges de diffraction diffèrent des franges d'interférences. Dans le cas d'une source secondaire de forme circulaire, les franges de diffraction sont des anneaux centrés sur une tache centrale.

Quand la source primaire n'est plus ponctuelle (situation 4 de l'encadré 4), la figure observée sur l'écran est moins contrastée (cohérence spatiale partielle). Cela s'explique en disant qu'elle résulte de la superposition des figures d'interférences données par chaque point de la source primaire. Les figures d'interférences étant décalées l'une par rapport à l'autre, les maxima d'une figure peuvent coïncider avec les minima d'une autre et les franges disparaître. Alors que dans les situations précédemment décrites de cohérence spatiale totale (source ponctuelle, trous ponctuels ou non), seul le principe de superposition des ondes doit être utilisé, dans cette situation de cohérence spatiale partielle, le principe de superposition des ondes est d'abord utilisé pour obtenir la figure d'interférences donné par un point de la source primaire puis une règle

d'addition des intensités des figures d'interférences données par chaque point de la source primaire.

Lorsque la source ponctuelle éclaire non pas deux trous mais trois (situation 2 de l'encadré 4), nous observons une figure d'interférences différente de celle obtenue avec deux trous. Si les franges d'intensité maximale sont plus lumineuses que dans le cas de deux trous, elles sont aux mêmes endroits et plus fines que dans le cas de deux trous, et il y a, en plus, entre deux franges consécutives, une frange brillante d'intensité plus petite entourée de deux franges sombres (encadré 5). Pour interpréter cette répartition de l'intensité lumineuse sur l'écran, on procède de la même façon que dans le cas de deux trous : on utilise d'abord le principe de superposition des ondes qui conduit à additionner les fonctions associées aux ondes issues de chacun des trous, ici au nombre de trois et non de deux, et on prend ensuite la valeur moyenne temporelle du carré de la fonction somme.



Encadré 5 • **Interférences avec deux puis trois sources secondaires (Duffait, 1997, p. 62)**

Nombre de sources secondaires (situations 1 et 2)

À la première question où un trou est caché, une majorité d'étudiants répond correctement, en disant que la figure observée n'est pas identique à celle de la situation de référence. En effet, 88 % des 57 étudiants disent qu'il n'y a plus d'interférences. La majorité des justifications (47 %) mentionne qu'il faut au moins deux sources pour avoir des interférences : « *phénomène d'interférence s'il y a au moins deux sources secondaires, on n'observe pas sur l'écran une figure identique à celle de la situation de référence* ». 12 % précisent qu'une tache est observée sur l'écran. Ce résultat est différent de celui obtenu par Ambrose *et al.* (1999) auprès d'étudiants de première année d'université aux États-Unis. En effet, 40 % d'entre eux (N = 200) affirme l'existence d'interférences quand une des fentes d'Young est cachée. Tout se passe comme si la figure observée sur l'écran était pour eux la juxtaposition ou la superposition des figures de diffraction données par chaque fente.

À la deuxième question mettant en jeu trois trous, beaucoup d'étudiants ne répondent pas (23 %, $N = 57$) ou donnent une réponse incorrecte. En effet, pour 23 % des étudiants, la figure d'interférences n'a pas changé. Pour quelques-uns, ce n'est qu'« *une figure d'interférence à trois trous* » (9 %). Quelques justifications (4 %) sont proches de celles obtenues par Ambrose: la figure d'interférences semble être la superposition des figures de diffraction produites par un trou, « *chaque source produit son propre système d'interférence* ».

54 % des étudiants répondent que la figure d'interférences a changé. 7 % des étudiants seulement disent qu'il existe un phénomène d'interférence « *avec augmentation du nombre de franges* ». Beaucoup (40 %) considèrent que l'intensité augmente. On rencontre trois types de raisonnement, tous incorrects, qui ne s'appuient pas sur le principe de superposition des ondes mais sur une règle d'addition des intensités des figures d'interférences :

- la figure correspondant aux trois trous semble être la superposition des figures produites par chaque trou « $I = I_1 + I_2 + I_3$ ». On retrouve ici un type de justification également fourni par les étudiants qui disent que la figure n'a pas changé.
- la figure correspondant aux trois trous correspond à la superposition de deux figures produites par deux trous: « *superposition de deux systèmes d'interférences l'un formé par S_3 et S_1 et l'autre par S_3 et S_2* ».
- la figure correspondant aux trois trous est une figure d'interférences à deux trous à laquelle on ajoute la figure due à un trou: « *le troisième trou introduit un autre système d'interférence* ».

Quel que soit le type de raisonnement, les étudiants ne considèrent pas que les trois trous sont cohérents entre eux. Les trous peuvent être tous incohérents (premier cas) ou cohérents deux par deux (deuxième cas). Deux trous peuvent être cohérents entre eux et incohérent avec le troisième (troisième cas).

Largeur des sources secondaires (situation 3)

À la troisième question où les trous ne peuvent plus être considérés comme ponctuels, 16 % des 57 étudiants ne répondent pas et 3 % disent qu'il n'y a pas de changement: « *on obtient une figure d'interférences identique à la première* ». Les autres étudiants, c'est-à-dire la majorité (81 %), répondent que la figure observée sur l'écran est différente, ce qui est correct.

Cependant, 23 % des étudiants (N=57) nient l'existence d'interférences: «*disparition d'interférence*». Leurs justifications (N = 45) laissent penser qu'ils considèrent les sources secondaires comme incohérentes, explicitement ou non. 22 % signalent un changement du contraste, d'autres (11 %) qu'«*il n'y a pas de cohérence*», que «*comme S'_1 et S'_2 sont larges, on ne peut pas voir l'interférence car cela revient à additionner des figures d'interférences décalées*».

Si 57 % des étudiants (N = 57) répondent qu'il existe des interférences, tous ne donnent pas une justification correcte. En effet, il est dit que «*la position des franges change*» (18 %, N = 57) ou que «*la figure est plus intense*» (16 %, N = 57). Il apparaît ici une association source étendue-franges plus lumineuses.

23 % des étudiants fournissent des justifications que l'on peut considérer comme correctes en soulignant la présence de la diffraction: «*les trous ne sont plus ponctuels dans ce cas on ne peut pas négliger le phénomène de diffraction. On aura dans l'expression de l'intensité un terme d'interférence et un terme de diffraction*». Il est cependant à noter qu'un seul mentionne une modification de la largeur de la zone d'interférences.

Nombre de sources primaires (situation 4)

À la quatrième question mettant en jeu deux sources primaires ponctuelles et non plus une, un petit nombre d'étudiants (8 %, N = 57) répondent qu'il n'y a pas de changement. Ces étudiants considèrent deux figures d'interférences mais ne semblent pas considérer qu'elles sont décalées: «*on va avoir deux systèmes de franges, l'un par rapport à S et l'autre à S'*», «*chaque source va donner ces franges sombres et brillantes*».

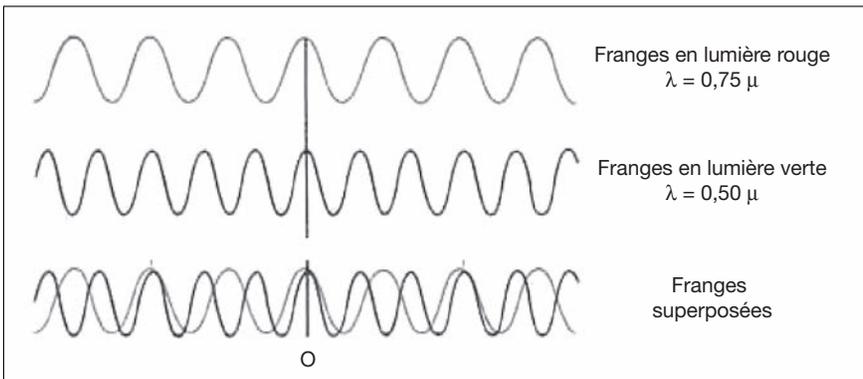
Un nombre important d'étudiants répondent correctement à savoir que la figure d'interférences est modifiée (92 %, N = 57). Si 61 % des justifications données sont compatibles avec l'utilisation d'une règle de superposition des figures d'interférences produites par chaque source ponctuelle, seuls 25 % des étudiants l'explicitent en disant que «*les intensités de S et S' s'additionnent*» (20 %), qu'«*il y a superposition de plusieurs figures d'interférences*» (5 %). Pour les autres, l'utilisation de cette règle reste implicite: 27 % des étudiants signalent uniquement un changement de contraste et 9 % que «*la luminosité est plus grande*».

Soulignons qu'un nombre non négligeable d'étudiants (30 %) mentionnent uniquement un déplacement des franges. Ces réponses laissent penser que les étudiants se sont focalisés uniquement sur la source supplémentaire.

Le principe de superposition des ondes en lumière polychromatique

Source primaire émettant deux radiations monochromatiques

Dans le questionnaire demandant quelles sont les modifications de la figure observée sur un écran lorsqu'une caractéristique de la situation de référence est modifiée, nous avons proposé une question mettant en jeu non plus une source primaire ponctuelle émettant une lumière monochromatique «rouge» mais une source ponctuelle émettant deux radiations monochromatiques, une «rouge» et une «verte». Avec ce type d'éclairage, nous observons sur l'écran une frange centrale jaune encadrée d'une frange sombre, puis de quelques franges jaunes bordées de vert et rouge, puis de jaune. Pour expliquer cela, on considère que chaque radiation donne sa figure d'interférences et que la figure observée sur l'écran résulte de la superposition d'une figure aux franges brillantes rouges et d'une figure aux franges brillantes vertes. Ces deux figures n'ayant pas le même interfrange, seul les franges centrales des figures coïncident : l'œil percevant jaune la superposition du rouge et du vert, la frange centrale paraît jaune. Près du centre le décalage est petit, si bien que des franges sombres et jaunes sont observées mais elles sont accompagnées de franges rouges et vertes (encadré 6).



Encadré 6 • Superposition des franges vertes et des franges rouges (Fontaine et al. 1967, p. 197)

Une majorité d'étudiants (84 %, N = 76) répond que la figure d'interférences observée sur l'écran est différente de celle de la situation de référence. 41 % des étudiants mentionnent une modification de la couleur des franges, 54 % d'une caractéristique géométrique et 31 % d'une caractéristique énergétique. Seulement 28 % des étudiants précisent la modification de couleur des franges.

34 % des étudiants considèrent les figures d'interférences des deux radiations. Parmi eux, nous trouvons les 22 % d'étudiants qui disent que les franges sont rouges et vertes « *les franges sont rouges et vertes* ». Une partie de ces étudiants (16 %) semblent penser que les figures associées à chaque radiation sont juste intercalées: il y a « *deux séries de franges décalées* » ou « *deux systèmes de franges* ». Les autres (18 %) semblent considérer aussi un effet résultant. 4 étudiants utilisent une règle d'addition des intensités: « *les intensités s'ajoutent* ». 2 étudiants tiennent compte de l'effet perceptif: « *il y a des franges irisées, la frange centrale est jaune et entourée de franges irisées rouges et vertes* ». Pour les autres, l'addition des intensités est implicite: « *disparition des franges, changement du contraste et observation de franges irisées* ».

33 % des étudiants semblent se focaliser sur la figure d'interférences de la radiation rajoutée par rapport à la situation de référence: « *interférence entre la même couleur (qui est la couleur verte)* » ou « *écartement change car il dépend de la longueur d'onde* ». Parmi eux, nous trouvons les 3 % d'étudiants qui disent que les franges sont vertes. On retrouve ici un type de raisonnement voisin de celui obtenu dans le cas des trous d'Young éclairés par deux sources ponctuelles.

Il est à noter que 16 % des étudiants ne répondent pas et que 3 % des étudiants envisagent un effet global en disant que les franges sont jaunes.

Sources secondaires émettant deux radiations monochromatiques différentes

Pour explorer cette question, nous avons proposé aux étudiants le dispositif des trous d'Young éclairé par une source ponctuelle de lumière blanche et indiqué qu'un filtre rouge était placé devant un trou et un filtre vert devant l'autre. Les lumières émises par les trous sont incohérentes. Il n'y a pas de franges d'interférences sur l'écran. Observé à l'œil, celui-ci paraît jaune.

Si 40 % (N = 65) des étudiants disent qu'il n'y a pas d'interférences, un grand nombre (49 %) disent qu'il y en a. Peu de justifications accompagnent les réponses correctes: elles font appel au concept de *cohérence* sans mentionner de quel type de cohérence il s'agit (7 %).

Parmi les 49 % d'étudiants qui donnent une réponse incorrecte, 39 % semblent considérer que la figure observée sur l'écran est la superposition de deux figures d'interférences: « *chaque longueur d'onde va donner son propre système d'interférence* ». Ces étudiants ne reconnaissent pas que les sources secondaires sont incohérentes. Tout se passe pour eux comme si la source primaire émettait deux radiations monochromatiques ou comme si chaque trou pouvait produire sa propre figure d'interférences. Une partie d'entre eux (24 %) semblent utiliser une

règle d'addition des intensités des figures d'interférences tout en tenant compte du récepteur œil en disant qu'il existe des franges «jaunes». Pour les autres (15 %), les franges sont «vertes et rouges». La question se pose de savoir s'ils utilisent implicitement une règle d'addition des intensités sans tenir compte du récepteur œil ou bien s'ils ne l'utilisent pas en considérant deux figures intercalées.

4 DISCUSSION

4.1 Le modèle du raisonnement des étudiants

Nous pouvons donner sens aux résultats que nous venons de présenter à l'aide d'un modèle de raisonnement, c'est-à-dire d'une description organisée et prédictive des principales tendances de raisonnement observées. Ces tendances sont interdépendantes et au nombre de quatre.

La première tendance de raisonnement, spécifique des interférences lumineuses, concerne leurs conditions d'obtention. Les étudiants interrogés savent qu'il est nécessaire d'avoir deux sources pour avoir des interférences. Cependant, il n'est pas nécessaire pour eux qu'elles soient obtenues à l'aide d'un dispositif interférentiel: il suffit qu'elles soient ponctuelles, de préférence identiques. Par contre, pour eux, il est nécessaire que les sources soient en phase: deux sources en opposition de phase ne peuvent pas produire des interférences. Dans le cas d'une source primaire monochromatique non ponctuelle, les étudiants envisagent une diminution du contraste et une disparition des franges, ou bien une augmentation de l'intensité des franges. Les étudiants ont des difficultés à identifier le degré de cohérence des sources secondaires. Ainsi, des sources secondaires étendues pourtant éclairées par une source monochromatique ponctuelle sont incohérentes. Deux sources secondaires émettant pourtant des lumières de fréquences différentes sont partiellement cohérentes.

La seconde tendance de raisonnement porte sur l'explication de l'existence de franges brillantes et sombres. Les étudiants n'utilisent pas le principe de superposition des ondes et les concepts de phase et déphasage. En effet, pour eux, les interférences ne résultent pas de la «combinaison» en un point donné de l'espace de deux ondes créées au niveau du dispositif interférentiel, ondes dont le déphasage dépend du point de l'espace considéré et dont l'intensité n'est pas modulée. Ils semblent suivre l'onde incidente depuis la source jusqu'au dispositif, considérer que le dispositif crée une onde modulée en intensité, et la suivre du dispositif à l'écran. Deux conceptions se manifestent. Dans l'une, l'onde modulée qui

se propage depuis le dispositif interférentiel est la superposition de deux ondes modulées. Dans l'autre, l'onde modulée qui se propage depuis le dispositif interférentiel est l'onde incidente modifiée. Dans les deux, le dispositif est une «boite noire» qui a pour fonction de moduler l'onde. La première conception rejoint celle dégagée par Ambrose *et al.* (1999) dans le cas des fentes d'Young : les étudiants utilisent une règle d'addition des intensités spécifique des situations d'optique géométrique classique pour des ondes modulées en intensité caractéristiques des situations ondulatoires. La seconde conception est à rapprocher de celle mise en évidence par Maurines (1997), Colin et Viennot (2000) dans le cas de la diffraction par une fente : les étudiants ne décomposent par l'onde se propageant derrière le dispositif en ondes élémentaires cohérentes. Leur raisonnement est de ce fait analogue à celui utilisé en optique géométrique classique.

Si la première conception ne se rencontre pas sur les résultats obtenus à la question portant sur l'effet de la suppression d'un trou dans le dispositif d'Young, elle apparaît sur les résultats obtenus à la question portant sur la figure d'interférences produites par trois trous : la figure d'interférences est comprise par certains étudiants comme la superposition des figures produites par chaque trou. Il semble que pour certains étudiants, la situation à deux sources soit la situation prototypique d'interférences si bien qu'ils tentent de s'y ramener : la figure d'interférences obtenue avec trois trous est ainsi conçue comme la superposition de figures produites par deux sources prises deux à deux, ou bien comme la superposition de la figure produite par deux trous et de la figure produite par un trou.

Comme nous l'avons déjà signalé, la conception consistant à penser la figure d'interférences comme la superposition de deux figures se rencontre fréquemment chez les étudiants interrogés par Ambrose *et al.* (1999) à propos de l'effet de la suppression d'une fente dans le dispositif d'Young. Une étude supplémentaire serait nécessaire pour comprendre pourquoi nous ne l'avons pas observé dans le cas de la suppression d'un trou d'Young. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées. Elle pourrait provenir de la situation choisie. Il est certainement plus difficile pour les étudiants de dissocier les phénomènes de diffraction et d'interférences dans le cas des fentes d'Young car les figures ont la même symétrie (elles sont toutes les deux constituées de franges rectilignes), ce qui n'est pas le cas des trous d'Young (les franges d'interférences sont rectilignes et celles de diffraction circulaires). Elle pourrait provenir de la méthodologie suivie. Nous n'avons interrogé les étudiants que sur cette situation des trous d'Young alors qu'Ambrose *et al.* ont auparavant questionné les étudiants sur la diffraction par une fente. Elle pourrait aussi provenir de l'enseignement reçu. En effet, un regard sur les manuels montre que le dispositif d'Young peut être étudié dans le chapitre sur les interférences ou dans celui sur la diffraction. Cela correspond à deux façons différentes

de nommer ce qui se passe avec ce dispositif et deux regards différents. Nous pouvons rencontrer les interférences par les fentes d'Young (l'accent est mis sur la nécessité d'avoir deux faisceaux) mais aussi la diffraction par les fentes d'Young (l'accent est mis sur la modification de l'onde incidente). Cela peut sans doute induire des visions différentes du phénomène d'interférences par le dispositif d'Young.

Si la conception consistant à suivre l'onde incidente depuis la source et à considérer le dispositif comme une boîte noire qui module l'intensité de l'onde se rencontre peu sur les résultats que nous avons présentés ici, elle se manifeste fréquemment dans les réponses fournies aux questionnaires sur les lames minces. Cependant, on peut se demander si le fait que les étudiants ne font pas appel au concept de différence de marche entre deux ondes pour justifier leurs réponses dans les questionnaires sur les trous d'Young n'en est pas une conséquence. On peut aussi se demander si cette conception n'est pas à l'origine des réponses obtenues par Ambrose *et al.* (1999) : les étudiants interrogés à propos de la façon dont varie l'état d'interférences en un point donné de l'espace en fonction de la position de ce point, raisonnent sur la direction moyenne « sources-point d'observation » et non sur la différence des distances séparant les sources et le point d'observation.

La troisième tendance qui se dégage concerne le raisonnement à plusieurs variables. Les étudiants ont des difficultés à dégager les grandeurs physiques pertinentes pour l'étude d'une situation donnée et à établir des liens corrects entre elles. Ils tendent à se focaliser sur un aspect de la situation étudiée et sur un nombre restreint de grandeurs. Ainsi, lorsque la source primaire est constituée de deux sources ponctuelles ou émet deux radiations monochromatiques, les étudiants semblent se focaliser sur l'une d'elles uniquement. Ils tendent aussi à se centrer sur la source : la phase en un point de l'espace ne semble pas dépendre de la distance parcourue par l'onde entre la source et ce point mais être égale à la phase de la source si bien qu'il n'y a pas d'interférences quand les sources secondaires sont en opposition de phase. Les questions portant sur les trous d'Young montrent que les étudiants ont des difficultés à faire un lien correct entre les caractéristiques de la situation d'interférences et de la figure d'interférences. On retrouve ici des difficultés analogues à celles mises en évidence par Wosilait *et al.* (1999) dans le cas des fentes Young et de l'effet d'une modification de l'écartement des fentes et de leurs largeurs.

La quatrième tendance de raisonnement concerne le caractère abstrait des concepts et principes. Les étudiants tendent à privilégier des indices perceptibles. Alors que les programmes d'enseignement accordent une grande place aux conditions d'obtention des interférences lumineuses liées à la cohérence temporelle de la lumière et à leur interprétation, les

étudiants privilégient les critères de cohérence spatiale associée à des grandeurs d'espace facilement identifiables au détriment des critères de cohérence temporelle. Ils ne font pas appel au modèle du train d'onde et à leur durée pour expliquer la différence de comportement des sources de lumière mais à l'étendue des sources.

Ces deux dernières tendances de raisonnement ne sont pas spécifiques des interférences lumineuses. Elles se rencontrent pour d'autres ondes et d'autres situations (Maurines, 1999, 2003), et plus généralement dans d'autres domaines de la physique (Viennot, 1996). Selon la situation présentée, la question posée et la formulation choisie, un étudiant se centrera sur tel ou tel aspect et activera l'une ou l'autre des tendances de raisonnement spécifiques des interférences lumineuses.

4.2 Quelques remarques sur les manuels d'enseignement et propositions pédagogiques

L'examen des manuels d'enseignement révèle que les approches choisies sont diverses et ne facilitent pas l'apprentissage des interférences lumineuses. Ainsi, en ce qui concerne la définition des interférences lumineuses, certains manuels n'utilisent qu'un registre mathématique et ne s'appuient sur aucune situation expérimentale (Charmont, 2000). Comme donner du sens en physique suppose d'établir des liens entre les phénomènes et les modèles, il nous semble préférable de partir d'une situation expérimentale.

En ce qui concerne le dispositif d'Young, il nous semble que le dispositif des trous n'est pas à négliger même s'il ne peut pas donner lieu à des calculs simples. Il permet de mettre beaucoup plus facilement en évidence la différence entre les franges de diffraction et d'interférences que les fentes d'Young, et donc de montrer que la figure d'interférences résulte bien de la superposition cohérente des ondes issues des deux trous.

En ce qui concerne les conditions d'obtention des interférences, certains manuels ne les mentionnent pas lors du premier cours (Quaranta, 1998). Le phénomène est étudié complètement dans le cas de la cohérence totale et ce n'est qu'ensuite que les conditions d'obtention sont abordées. Comme cela pourrait renforcer l'idée qu'il suffit d'avoir deux sources ponctuelles monochromatiques pour avoir des interférences, il nous semble préférable d'accompagner la définition des interférences lumineuses de la donnée des conditions d'obtention. Il nous semble aussi souhaitable d'utiliser différentes conditions expérimentales et de décrire à chaque fois qualitativement la figure d'interférences. Cela permettrait de dégager les différentes grandeurs physiques intervenant dans une situation donnée et les liens qu'elles entretiennent ou n'entretiennent pas.

En ce qui concerne l'interprétation des conditions d'obtention, certains manuels ne mentionnent pas le modèle du train d'onde (Martin, 1998). La plupart de ceux qui l'introduisent ne le font pas fonctionner pour expliquer pourquoi l'état d'interférences en un point donné de l'espace est constructif ou destructif. Compte tenu des résultats présentés ici et d'autres obtenus par ailleurs, cela nous semble regrettable car faire fonctionner ce modèle pourrait aider à donner du sens au fait que deux sources indépendantes ne peuvent produire des interférences.

Terminons en disant que les différents questionnaires que nous avons élaborés pour notre recherche peuvent aider à définir un contenu d'enseignement. Ils proposent des questions pouvant être posées à différents moments de l'apprentissage, en cours, en séances de travaux pratiques ou de travaux dirigés. Il en est ainsi de celle sur les sources secondaires en opposition de phase ou émettant des radiations différentes.

CONCLUSION

Le modèle de raisonnement que nous avançons permet de rendre compte des résultats obtenus pour les deux thèmes sur lesquels porte cet article. Soulignons qu'il prend tout son sens lorsque l'ensemble de nos résultats est considéré. Les différentes tendances de raisonnement que nous venons de présenter se manifestent en effet différemment selon les thèmes explorés. Dans l'attente de leur publication, le lecteur intéressé par nos autres résultats, en particulier par ceux portant sur les dispositifs interférentiels qui mettent le mieux en évidence que les interférences sont créées au niveau du dispositif, peut d'ores et déjà consulter la synthèse de nos travaux (Romdhane, 2007).

Terminons en disant que ce modèle de raisonnement a été obtenu à partir de réponses fournies par une population hétérogène à des questions qualitatives portant sur des situations d'interférences à deux ondes. La question se pose donc d'explorer ses limites, notamment en élargissant le domaine d'étude à d'autres types d'interférences et en rendant possible une étude comparative systématique des résultats en fonction de l'enseignement suivi.

BIBLIOGRAPHIE

- AMBROSE B.S., SCHAFFER P.S., STEINBERG R.N. & MC DERMOTT L. (1999). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double slit-interference. *American Journal of Physics*, vol. 67, n° 2, p. 146-155.
- CHARMONT P. (2000). *Leçons de physique*. Paris, Dunod.
- CLOSSET J.L. & VIENNOT L. (1984). Contribution du raisonnement naturel en physique. In B. Schiele ans C. Belisle (eds) *Les représentations. Communication-information*, vol. 6, n° 2/3, p. 399-420.
- COLIN P. & VIENNOT L. (2000). Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'image optique. *Didaskalia*, n° 17, p. 29-54.
- DUFFAIT R. (1997). *Expériences d'optique, agrégation de science physique*. Paris, Bréal.
- FONTAINE G. et al., (1967). *La physique au baccalauréat CDE*. Paris, Nathan.
- GOLDBERG F.M. & MC DERMOTT L. (1987). An investigation of students understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *American Journal of Physics*, vol. 55, n° 2, p. 108-119.
- HECHT E. (2002). *Optics*. United States of America, Addison-Wesley.
- KAMINSKI W. (1989). Conceptions des enfants (et des autres) sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, p. 973-996.
- LINDER C. & ERICKSON G. (1989). A study of tertiary students' conceptualizations of sound. *International Journal of Science Education*, n° 11, special issue, p. 491-501.
- MARTIN G. (1998). *Panorama sur l'optique; de l'optique géométrique à l'optique quantique*. Paris, Nathan.
- MAURINES L. & SALTIEL E. (1988). Mécanique spontanée du signal. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 707, p. 1023-1041.
- MAURINES L. (1997). Raisonnement spontané sur la diffraction. In *actes du sixième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*, Lyon, p. 77-95.
- MAURINES L. (1998). Les élèves et la propagation des signaux sonores. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 800, p. 1-22.
- MAURINES L. (1999). La propagation des ondes en dimension 3 : analyse des difficultés des étudiants quant au modèle géométrico-ondulatoire. *Didaskalia*, n° 15, p. 87-122.
- MAURINES L. (2000). Les étudiants, la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent. *Didaskalia*, n° 17, p. 55-99.
- MAURINES L. (2003). Analyse des difficultés des étudiants à propos des concepts de phase et de surface d'onde, du principe de Huygens. *Didaskalia*, n° 22, p. 9-39.
- MINSTRELL J. (1992). Facets of students' knowledge and relevant instruction. In R. Duit, F. Goldberg and H. Niedderer (éd.) *Research in physics learning: theoretical issues and empirical studies*. Kiel, IPN, p. 110-128.
- QUARANTA L. (1998). *Introduction à l'optique*. Paris, Masson.
- ROMDHANE I. (2001). *Conceptions des étudiants tunisiens sur la notion de déphasage: Étude historique et didactique*. Mémoire de DEA, Université de Tunis.
- ROMDHANE I. (2007). *La cohérence de la lumière et les interférences lumineuses. Raisonnements des étudiants et difficultés d'ordre historique*. Thèse de doctorat. Université Paris 7.
- ROMDHANE I. & MAURINES L. (2003). Les étudiants et les interférences lumineuses : résultats d'une enquête exploratoire. In *3^{es} Rencontres scientifiques de l'ARDIST*, Toulouse, p. 165-172.

ROMDHANE I. & MAURINES L. (2005). La cohérence de la lumière et les interférences : Histoire des idées et difficultés des étudiants. In *4^{es} Rencontres de l'ARDIST*, Lyon, p. 309-316.

SINGH A. & BUTLER P.H. (1990). Refraction: conception and knowledge structure. *International Journal of Science Education*, vol. 12, n° 4, p. 492-442.

VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique. La part du sens commun*. Bruxelles, De Boeck.

WITTMANN M. C., STEINBERG R.N. & REDISH E.F. (1999). Making sense of how students make sense of mechanical waves. *The Physics Teacher*, n° 37, p. 15-21.

WOSILAIT K., HERON P.R., SCHAFFER P.S. & MC DERMOTT L.C. (1999). Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light. *Physics Education Research, American Journal of Physics*. Supplément, vol. 67, n° 7, p. S5-S15.